



DVYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ SOLÁRNÍ SUŠÁRNY

PILOT SCALE SOLAR DRYER DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ PLUCAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LUCIE HOUDKOVÁ, PH.D.

BRNO 2011

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou technického sušení, principů, druhů a typů sušení a možností využitelnosti solárního sušení čistírenských kalů na území České republiky. Stěžejní částí práce je návrh experimentální sušicí komory na sušení odvodněných kalů, včetně přehrabovacího zařízení. Součástí práce je výpočet parametrů jednotlivých konstrukčních prvků a výkresová dokumentace navrženého zařízení.

ABSTRACT

This Diploma's thesis is addressing the issues of technical drying, principles and types of technical drying, solar drying possible usefulness of sewage sludge in the Czech Republic. The main part is pilot scale solar dryer design for drying dewatered sewage sludge, chain scraper design including. Part of this diploma's thesis is single structural elements parameter calculation and drawing documentation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLUCAR, T. *Návrh experimentální solární sušárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a odborné literatury uvedené v seznamu. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FSI VUT.

.....
podpis diplomanta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Lucii Houdkové Ph.D. za odborné vedení, připomínky a cenné rady při realizaci této diplomové práce.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	12
2. TECHNICKÉ SUŠENÍ	13
2.1 Základní principy sušení	13
2.1.1 Konvektivní sušení	15
2.1.2 Kontaktní sušení	20
2.1.3 Radiační sušení	22
2.2 Metody sušení	23
2.2.1 Lyofilizace	23
2.2.2 Vakuové sušení	24
2.2.3 Horkovzdušné sušení	24
2.2.4 Mikrovlnné sušení	25
3. SUŠENÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ	26
3.1 Čistírna odpadních vod	26
3.1.1 Kalové hospodářství	27
3.2 Sušení čistírenských kalů	32
3.2.1 Kontaktní sušení čistírenských kalů	32
3.2.2 Konvekční sušení čistírenských kalů	33
3.3 Vlastnosti čistírenských kalů	35
3.4 Využití solární energie k sušení kalů na území ČR	37
3.5 Využití solární energie k sušení kalů v zahraničí	39
3.5.1 Huber Technology	39
3.5.2 Roediger BioEnergie GmbH	40
3.5.3 Parkson Corporation	41
3.6 Porovnání konvenčního a solárního sušení	42
4. NÁVRH SOLÁRNÍ SUŠÁRNY	44
4.1 Návrh a konstrukce komory sušárny	44
4.1.1 Požadavky na konstrukci	44
4.1.2 Zatížení konstrukčního systému	46
4.2 Návrh konstrukce přehrabovacího zařízení	56
4.2.1 Výběr nejvhodnější varianty přehrabovacího zařízení	56
4.2.2 Výběr jednotlivých konstrukčních prvků přehrabovacího systému	59
4.2.3 Posouzení zatěžovaných prvků z hlediska zatížení vlastní hmotností a hmotností jednotlivých komponent	64
4.3 Materiálová a tepelná bilance sušárny	78
4.3.1 Materiálová bilance	78
4.3.2 Tepelná bilance	79
4.4 Provozní a pořizovací náklady	80
5. ZÁVĚR	82
6. POUŽITÁ LITERATURA	84
7. SEZNAM PŘÍLOH	87

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
A	Plocha	[m ²]
a	vzdálenost zatěžující síly F_A (F_B) od kraje hřídele	[m]
b	vzdálenost zatěžující síly F_1 (F_2) od zatěžující síly F_A (F_B)	[m]
b_w	Wienova konstanta	[mK]
c	vzdálenost zatěžujících sil F_1 a F_2	[m]
$c_0(z)$	součinitel orografie – horopisu	[-]
c_{dir}	součinitel směru větru	[-]
C_e	součinitel okolního prostředí	[-]
$c_e(z)$	součinitel expozice	[-]
c_f	součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky	[-]
$c_{f,0}$	součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy a bez uvažování vlivu koncových vírů	[-]
c_{pe}	součinitel vnějšího tlaku	[-]
c_{pi}	součinitel vnitřního tlaku	[-]
$c_r(z)$	součinitel nerovnosti terénu	[-]
$c_s c_d$	součinitel konstrukce	[-]
c_{season}	součinitel ročního období	[-]
c_{ss}	měrná tepelná kapacita sušeného materiálu	[kJ/kg·°C]
D	vnější průměr hřídele (trubka)	[m]
d	vnitřní průměr hřídele (trubka)	[m]
d_c	smyková rychlost	[s ⁻¹]
$\partial c / \partial x$	gradient koncentrace látkového množství rozpuštěné látky	
D_D	difuzivita	[m ² /h]
D_m	Průměr hřídele motoru s převodovkou	[m]
dn/dt	látkové množství rozpuštěné látky, která projde, za časovou jednotku, jednotkovým průřezem	
D_{sb}	průměr hnacího ozubeného kola	[m]
D_{sp}	průměr hnaného ozubeného kola	[m]
d_y	gradient rychlosti	[s ⁻¹]
E	Youngův modul pružnosti	[Pa]
\vec{F}_1	síla působící na hřídel vlivem hmotností oz. kol a přehrabováku	[N]
\vec{F}_2	síla působící na hřídel vlivem hmotností oz. kol a přehrabováku	[N]
\vec{F}_A	síla působící na hřídel vlivem celkové hmotnosti přehrabovacího zařízení	[N]
\vec{F}_B	síla působící na hřídel vlivem celkové hmotnosti přehrabovacího zařízení	[N]
F_c	síla působící na rohovou konzolu	[N]

Návrh experimentální solární sušárny

F_{cx}	horizontální složka síly působící na rohovou konzolu	[N]
F_{cy}	vertikální složka síly působící na rohovou konzolu	[N]
F_d	síla, kterou působí stojná noha na podložku	[N]
F_{T2}	Síla působící na hnací řetěz na nabíhající straně	[N]
h_1	entalpie vzduchu	[kJ/kg]
h_3	entalpie vlhkého vzduchu na výstupu	[kJ/kg]
h'_m	entalpie suchého materiálu na vstupu	[kJ/kg]
h''_m	entalpie suchého materiálu na výstupu	[kJ/kg]
h'_w	entalpie volné vlhkosti na vstupu	[kJ/kg]
h''_w	entalpie volné vlhkosti na výstupu	[kJ/kg]
J	kvadratický moment	[m ⁴]
k	Koeficient pro úpravu krouťícího momentu	[-]
k_k	bezpečnost	[-]
k_U	koeficient přestupu hmoty	[m/h]
M_{0max}	maximální moment	[MPa]
m_c	celková hrubá hmotnost konstrukce	[kg]
M_e	intenzita vyzařování černého tělesa	[W/m ²]
m_{CH}	hmotnost řetězu	[kg]
M_K	krouťící moment	[Nm]
M_{Kreal}	reálný krouťící moment	[Nm]
m_m	hmotnost suchého materiálu.	[kg]
\dot{m}'_m	množství suchého materiálu na vstupu	[kg/h]
\dot{m}''_m	množství suchého materiálu na výstupu	[kg/h]
m_R	hmotnost přehrabováku	[kg]
m_S	hmotnost ozubeného kola	[kg]
m_{Sh}	hmotnost hřídele	[kg]
M_t	třecí moment	[Nm]
m_v	hmotnost vzduchu	[kg]
\dot{m}'_v	množství suchého vzduchu na vstupu	[kg/h]
\dot{m}''_w	množství suchého vzduchu na výstupu	[kg/h]
\dot{m}''_{vw}	Hmotnost vlhkosti	[kg]
\dot{m}'_w	množství vlhkého materiálu na vstupu do sušárny	[kg/h]
\dot{m}''_w	množství vlhkého materiálu na výstupu	[kg/h]
n_{Sh}	počet otáček hřídele	[ot/min]
n_{sp}	počet otáček oz. kola	[ot/min]
p_A	parciální tlak vody ve vzduchu	[Pa]
p_A^0	tenze vodní páry při dané teplotě	[Pa]
p_{aw}	parciální tlak vodní páry ve vzduchu	[Pa]

Návrh experimentální solární sušárny

P_m	výkon pohonné jednotky	[W]
Q	množství tepla	[MJ/h]
\dot{q}	tok tepla na jednotku plochy stěny	[W/m ²]
\bar{q}	liniové zatížení	[Nm]
q_b	základní dynamický tlak větru	[N/m ²]
Q_D	dodané teplo	[MJ/h]
Q_p	přídavné teplo	[MJ/h]
$q_p(z)$	maximální dynamický tlak v referenční výšce z	[N/m ²]
$q_p(z_e)$	maximální dynamický tlak v referenční výšce z_e	[N/m ²]
$q_p(z_i)$	maximální dynamický tlak v referenční výšce z_i	[N/m ²]
Q_z	tepelné ztráty	[MJ/h]
R_{Sh}	poloměr hřídele	[m]
S	velikost teplosměnné plochy	[m ²]
s	zatížení sněhem na střeších	[kPa]
s_k	charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi	[kPa]
Σm_C	hmotnosti přehrnovacího zařízení	[kg]
T	termodynamická teplota tělesa	[K]
T_1	tahová síla řetězu na nabíhající straně hnacího řetězu	[N]
T_2	tahová síla řetězu na odbíhající straně hnacího řetězu	[N]
T_3	tahová síla řetězu na nabíhající straně hnaného řetězu	[N]
T_4	tahová síla řetězu na odbíhající straně hnaného řetězu	[N]
T_{max}	Maximální tahová síla	[N]
t_{ch}	teplota v komoře sušárny	[°C]
t_m	teplota sušeného materiálu	[°C]
t_{st}	teplota povrchu stěny	[K]
t_t	teplota v jádře tekutiny	[K]
$v_{b,0}$	výchozí základní rychlost větru	[m/s]
v_s	rychlost na obvodu ozubeného kola	[m/s]
$w(x)$	průbyb	[m]
W_0	příčný materiálový průřez	[N/m]
w_e	tlak větru působící na vnější povrchy konstrukce	[N/m ²]
w_i	tlak větru působící na vnitřní povrchy konstrukce	[N/m ²]
\bar{X}_w	Koncentrace vody v materiálu - hmotnostní zlomek	[-]
\bar{Y}	Vlhkost vzduchu	[-]
\bar{Y}_1	vlhkost vzduchu	[-]
\bar{Y}_3	vlhkosti vzduchu na výstupu	[-]
Y_A	střední hodnota vlhkosti vzduchu	[%]
Y_{Aw}	hodnota na fázovém rozhraní mezi vzduchem a mokřím materiálem	[%]

Návrh experimentální solární sušárny

z	výška nad terénem	[m]
z_0	délka nerovnosti	[m]
z_e	referenční výška pro vnější tlak	[m]
z_i	referenční výška pro vnitřní tlak	[m]
z_{\max}	maximální výška nerovnosti	[m]
z_{\min}	minimální výška nerovnosti	[m]
α	součinitel přestupu tepla	[W/m ² .K]
α_s	úhel svírající střecha komory s horizontální složkou	[°]
α_{sh}	úhlové zrychlení	[rad/s ⁻²]
η	dynamická viskozita	[Pa.s]
λ	koeficient tepelné vodivosti	[J/mKs]
λ_{\max}	vlnová délka maxima vyzařování	[m]
μ_i	tvarový součinitel zatížení sněhem	[-]
ρ	hustota	[kg/m ³]
σ	Stefan Boltzmanova konstanta	[W/m ² .K ⁴]
σ_k	maximální napětí	[Pa]
σ_{\max}	maximální dovolené napětí	[Pa]
τ_0	počáteční smykové napětí	[Pa]
τ_t	čas	[s]
φ	relativní vlhkost	[%]
Φ_A	rychlost sušení	[kg/m ² s]
ψ_r	redukční součinitel pro čtvercové průřezy ze zaoblenými rohy	[-]
ψ_λ	součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci	[-]
ω_S	úhlová rychlost ozubeného kola	[rad/s]

1 ÚVOD

Vzhledem k neustálému nárůstu vznikajících odpadů je naprosto nutné najít způsob, jak tyto odpady zlikvidovat. Nejeefektivnější způsob, jak zabránit nárůstu odpadu je samozřejmě předcházet jeho vzniku. Vznikne-li ale odpad, je potřeba se jej nějakým způsobem zbavit nebo nejlépe ho využít jako druhotnou surovinu nebo zdroje energie. Stále převládající způsob likvidace odpadu je skládkování.

Skládkování je stále nejméně finančně náročná metoda likvidace odpadu. Je to ale způsob velmi náročný na zastavěnou plochu a v neposlední řadě je skládkování ekologická zátěž, která se podepisuje na změně rázu krajiny. Trend vyspělých zemí je takový, že se od skládkování upouští a je snaha odpad využít, pokud možno v lidský prospěch a zároveň ulehčit životnímu prostředí.

Nakládat s čistírenským kalem jako s odpadem lze několika způsoby. Skládkování, jak již bylo nastíněno, není efektivní způsob. Čistírenský kal jako hnojivo je přijatelnější způsob, avšak problém může nastat při jeho hygienizaci. Třetím způsobem je energetické využití kalu. Spálením kalu se zbavíme jeho 90 % objemu a navíc lze vzniklé teplo využít či dále transformovat na jiný druh energie.

Cesta k získání spalitelného kalu je dlouhá. Kal prochází složitým procesem již v čistírně odpadních vod. Od mechanického čištění přes biologický stupeň, chemický stupeň a v neposlední řadě sušení. Vysušení kalu na určitou hodnotu sušiny je pak klíčovou charakteristikou výhřevnosti. Aby byl kal konkurenceschopný s klasickými typy paliv, je nutné získat substrát s minimálním obsahem suché složky 90 %. Sušení kalu velice prodražuje, proto je nutné najít finančně přijatelný způsob sušení. Tímto způsobem by mohlo být sušení za pomoci alternativních zdrojů energie.

Cílem návrhu experimentální solární sušárny je najít optimální cenu malé sušárny s efektivním sušícím systémem využívající energii slunečního záření, a tím srazit provozní náklady na minimum. Stěžejním bodem celého aparátu je přehrabovací zařízení. Úkolem navrhnout takový systém přehrabování, aby byl kal ve stálé permanenci a mohlo tak dojít k odpaření vázané vody v materiálu.

2 Technické sušení

2.1 Základní principy sušení

Sušení je děj, při kterém se obecně odstraňuje nežádoucí kapalina obsažená v materiálu plynném, kapalném nebo pevném. V praxi se nejčastěji setkáváme se „sušením v užším slova smyslu“, kdy je nutno odstraňovat vodu (složka W) z pevné látky (složka M) odpařováním do proudu předeřátého vzduchu (složka V). Je to poměrně komplikovaný děj, při kterém současně dochází ke sdílení tepla a hmoty. Ve velkém množství používaných sušáren dochází ke sdílení tepla potřebného k odpaření vody konvekcí ze vzduchu do sušeného materiálu.

Z hlediska sdílení hmoty je nutno chápat sušení jako difúzní proces. Voda, která je v materiálu obsažena, bude v průběhu sušení přecházet z povrchu materiálu do proudu vzduchu (vnější difúze) a po jisté době, kdy se vytvoří gradient vlhkosti v materiálu, bude docházet k difúzi vody uvnitř materiálu směrem k jeho povrchu (vnitřní difúze). Rychlost pomalejšího z dějů pak určuje celkovou rychlost sušení.

Rovnice popisující difúzi se jmenují Fickovy zákony. První Fickův zákon (2.1): Látkové množství rozpuštěné látky, která projde za časovou jednotku jednotkovým průřezem (plocha průřezu je kolmá ke gradientu koncentrace), dn/dt , je přímo úměrné gradientu koncentrace látkového množství rozpuštěné látky $(\partial c / \partial x)_t$, čili hustota difúzního toku v daném místě a v daném okamžiku je přímo úměrná gradientu koncentrace látkového množství rozpuštěné látky. Konstanta úměrnosti je difúzní součinitel D_D (difuzivita) [m^2/h]

$$\left(\frac{dn}{dt}\right) = -D_D \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_t \quad (2.1)$$

Druhý Fickův zákon (2.2) vyjadřuje změnu gradientu koncentrace s časem. Mění-li se koncentrace s časem, potom je časová změna koncentrace určena vztahem pro $D_D = \text{konst.}$, čili časová změna koncentrace ve zvolené vrstvě je úměrná změně gradientu koncentrace v této vrstvě.

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right) \quad (2.2)$$

Vlhký materiál je možno považovat za binární směs absolutně suché pevné látky a vody (pro kterou se při sušení používá také termín vlhkost). Koncentrace vody v materiálu je vyjadřována pomocí jejího relativního hmotnostního zlomku [26].

$$\bar{X}_w = \frac{m_w}{m_m} \quad (2.3)$$

kde je m_w hmotnost vlhkosti [kg] a m_m hmotnost suchého materiálu [kg].

Z hlediska odstranitelnosti je vlhkost dělena na volnou, kterou lze v daných podmínkách odstranit, a na neodstranitelnou - rovnovážnou, která v materiálu zůstává i při nekonečně dlouhém sušení materiálu v daném prostředí (teplota, vlhkost), tj. je v rovnováze s obsahem vody ve vzduchu. Hodnota rovnovážné vlhkosti závisí na vlastnostech sušicího vzduchu a sušeného materiálu [26].

Vlhkost vzduchu se vyjadřuje buď relativním hmotnostním zlomkem

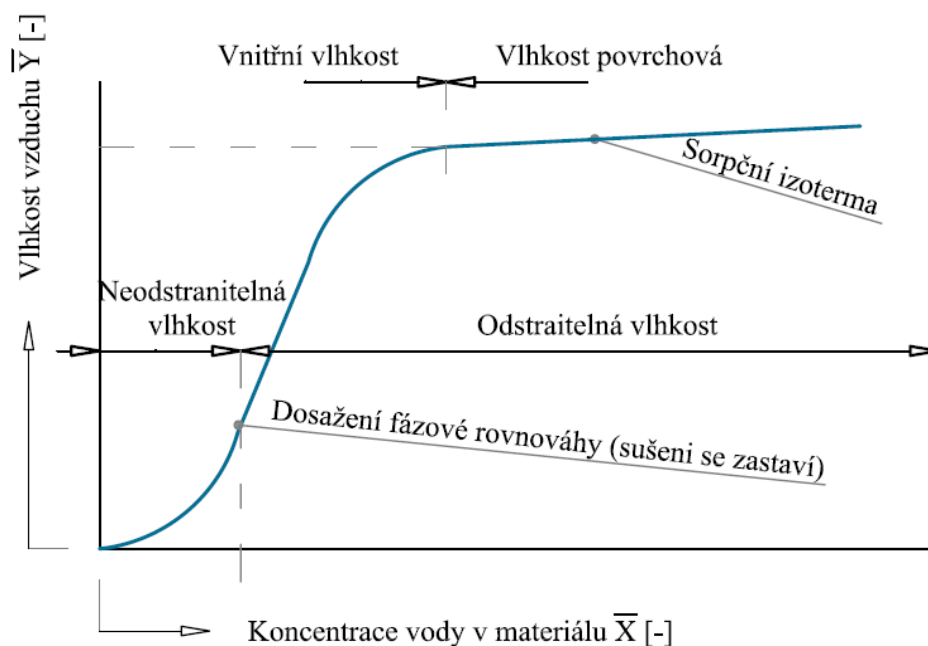
$$\bar{Y} = \frac{m_w}{m_v} \quad (2.4)$$

kde m_w je hmotnost vlhkosti [kg] a m_v hmotnost suchého vzduchu [kg], nebo jako relativní vlhkost

$$\varphi = \frac{p_A}{p_A^0} \quad (2.5)$$

kde p_A je parciální tlak vody ve vzduchu [Pa], p_A^0 je tenze vodní páry při dané teplotě [Pa].

Na obrázku 2.1 je zobrazena závislost koncentrace vody v materiálu na vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě. Křivka se nazývá sorpční izoterma a lze z ní vyčíst, kdy je vlhkost obsažená v materiálu odstranitelná a kdy nelze odstranit (i když bude sušení probíhat nekonečně dlouho). Vlhkost odstranitelná je limitována vlhkostí sušicího média. Je-li potřeba snížit vlhkost, je použito jiného sušicího média s nižší vlhkostí nebo jiné teploty [27].



Obr. 2.1 Fázová rovnováha při sušení [27]

Při sušení probíhá současně sdílení hmoty a sdílení tepla. Popis takového procesu je založen na popisu toho děje, na němž nejvíce závisí celková rychlost procesu. U sušení je to sdílení hmoty s hybnou silou rovnou rozdílu koncentrací sdílené složky. Pomocí této hybné síly se pak vyjadřuje rychlost děje. Rychlost sušení vyjádřená jako intenzita hmotnostního toku vlhkosti je podle obecné definice této veličiny [26].

$$\Phi_A = \frac{d^2 m_w}{dA \cdot d\tau_t} \quad (2.6)$$

Kde A je plocha [m^2] a τ_t je čas [s].

Závisí obecně na čase a místě v sušárně a souvisí s podmínkami, při nichž sušení probíhá. Vyjádřit ji lze pomocí rovnice přestupu hmoty v plynné fázi jako

$$\Phi_A = k_U \cdot (Y_{AW} - Y_A) \quad (2.7)$$

Zde je k_U koeficient přestupu hmoty [m/h] založený na hybné síle vyjádřené relativními hmotnostními zlomky vlhkosti ve vzduchu, Y_A [-] představuje střední hodnotu vlhkosti vzduchu a Y_{AW} [-] hodnotu na fázovém rozhraní mezi vzduchem a mokřím materiálem. Jiný způsob vyjádření rychlosti sušení je pomocí parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu [26].

$$\Phi_A = k_P \cdot (p_{AW} - p_A) \quad (2.8)$$

2.1.1 Konvektivní sušení

Konvekční přenos tepla (proudění) se skládá ze dvou mechanismů. Jednak je to přenos energie v důsledku náhodného molekulárního pohybu a jednak může docházet k přenosu energie celkovým nebo makroskopickým pohybem tekutiny. Při tomto druhu konvekce dochází, v každém okamžiku, k hromadnému přesunu většího počtu molekul.

Jestliže je proudění způsobeno nuceným, uměle vyvolaným pohybem tekutiny (jako je například čerpadlo, ventilátor), jedná se o nucenou konvekci. Jestliže je proudění způsobeno vlivem rozdílu hustot tekutiny, pak se jedná o konvekci volnou neboli přirozenou [2], [4], [5], [6], [7].

Hustota tepelného toku při konvekci se určí z Newtonova vztahu:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta t = \alpha \cdot (t_{st} - t_t) \quad (2.9)$$

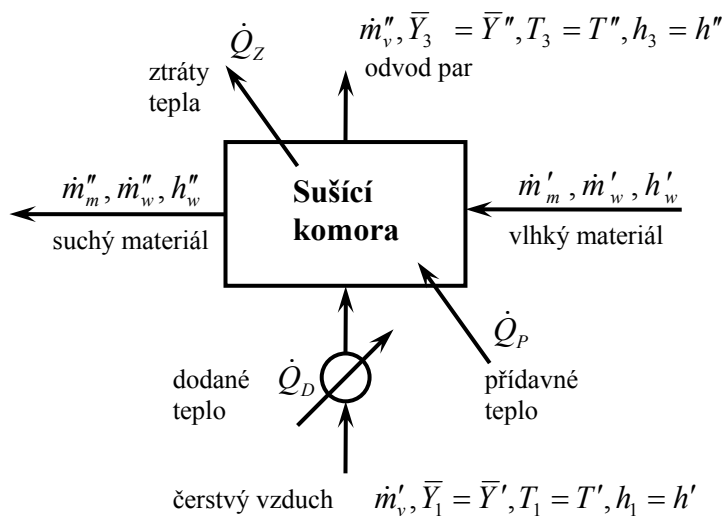
kde \dot{q} [W/m^2] je tok tepla na jednotku plochy stěny, α [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$] je součinitel přestupu tepla, t_{st} [K] je teplota povrchu stěny a t_t [K] je teplota v jádře tekutiny, většinou definovaná jako střední teplota tekutiny přes průtočný průřez. Newtonův ochlazovací zákon, jak je též tento zákon nazýván, vystihuje základní kvalitativní rys přestupu tepla, že tok tepla roste s hnací silou ($t_{st} - t_t$), v prvním přiblížení přímo úměrně. Tento zákon formuluje úlohu popisu přestupu tepla jako úlohu nalezení hodnoty součinitele přestupu tepla α . Celkový tepelný tok je:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = \alpha \cdot S \cdot (t_{st} - t_t) \quad (2.10)$$

kde $S [m^2]$ je velikost teplosměnné plochy

Konvekční sušení je nejrozšířenější způsob sušení, při kterém je sušicím médiem nejčastěji vzduch nebo spaliny. Sušárny pracující na tomto principu mohou pracovat přetržitě i nepřetržitě. Nejznámějším typem konvekčních sušáren jsou: sušárna komorová (skříňová), bubnová (rotační) sušárna, proudová (pneumatická) sušárna, rozprašovací sušárna, fluidní sušárna.

Materiálová a tepelná bilance teoretické sušárny – sušení teplým vzduchem (konvekce):



Obr. 2.2 Proudové schéma kontinuální sušárny [27]

Hmotnostní bilance kontinuální sušárny: (obr. 2.1)

$$\dot{m}'_m + \dot{m}'_w + \dot{m}'_v \cdot (1 + \bar{Y}_1) = \dot{m}''_m + \dot{m}''_w + \dot{m}''_v \cdot (1 + \bar{Y}_3) \quad (2.11)$$

Kde na vstupu do sušárny je množství suchého materiálu \dot{m}'_m [kg/h], množství vlhkosti v materiálu \dot{m}'_w [kg/h], množství suchého vzduchu \dot{m}'_v [kg/h] a \bar{Y}_1 [-] je množství vlhkosti vzduchu a na výstupu do sušárny je množství suchého materiálu \dot{m}''_m [kg/h], množství vlhkosti v materiálu \dot{m}''_w [kg/h], množství suchého vzduchu \dot{m}''_v [kg/h] a \bar{Y}_3 [-] je množství vlhkosti ve vzduchu.

Stanovíme-li předpoklad pro teoretickou sušárnu, kde množství suchého materiálu je konstantní $\dot{m}'_m = \dot{m}''_m = \dot{m}_m$ a zároveň množství suchého vzduchu je konstantní $\dot{m}'_v = \dot{m}''_v = \dot{m}_v$, $\dot{m}''_w = 0$ ($\dot{m}''_v \ll \dot{m}'_w$ za předpokladu téměř dokonalého vysušení), můžeme stanovit materiálovou bilanci, která je závislá pouze na vstupních a výstupních parametrech:

$$\frac{\dot{m}'_v}{\dot{m}'_w} = \frac{1}{\bar{Y}_3 - \bar{Y}_1} = \frac{1}{\bar{Y}'' - \bar{Y}'} \quad (2.12)$$

Tepelná bilance kontinuální sušárny: (obr. 2.1)

$$\dot{m}'_m \cdot h'_m + \dot{m}'_w \cdot h'_w + \dot{m}'_v \cdot h_1 + \dot{Q}_D + \dot{Q}_P = \dot{m}''_m \cdot h''_m + \dot{m}''_w \cdot h''_w + \dot{m}''_v \cdot h_3 + \dot{Q}_Z \quad (2.13)$$

Kde na vstupu do sušárny je množství suchého materiálu \dot{m}'_m [kg/h], entalpie suchého materiálu h'_m [kJ/kg], množství vlhkosti v materiálu \dot{m}'_w [kg/h], entalpie volné vlhkosti h'_w [kJ/kg], množství suchého vzduchu \dot{m}'_v [kg/h], entalpie vzduchu h_1 [kJ/kg], dodané teplo \dot{Q}_D [kJ/h] a přídavné teplo \dot{Q}_P [kJ/h] a na výstupu do sušárny je množství suchého materiálu \dot{m}''_m [kg/h], entalpie suchého materiálu h''_m [kJ/kg], množství vlhkosti v materiálu \dot{m}''_w [kg/h], entalpie volné vlhkosti h''_w [kJ/kg], množství suchého vzduchu \dot{m}''_v [kg/h], entalpie vlhkého vzduchu h_3 [kJ/kg] a tepelné ztráty \dot{Q}_Z [kJ/h].

Stanovíme-li předpoklad pro teoretickou sušárnu, kde neuvažujeme přídavné teplo \dot{Q}_P ani tepelné ztráty do okolí \dot{Q}_Z , $\dot{m}'_m \cdot h'_m = \dot{m}''_m \cdot h''_m$ (entalpie suchého materiálu se nemění), $\dot{m}''_w \cdot h''_w = 0$ ($\dot{m}''_w = 0$, materiál je vysušen), $\dot{m}'_w \cdot h'_w = 0$ (entalpie volné vlhkosti je proti výparnému teplu zanedbatelná), můžeme stanovit tepelnou bilanci teoretické sušárny:

$$\frac{\dot{m}'_v}{\dot{Q}_D} = \frac{1}{(h_3 - h_1)} \quad (2.14)$$

Spojením materiálové (rovnice 2.12) a tepelné bilance (rovnice 2.14) dostaneme rovnici (2.15), která platí pro teoretickou sušárnu:

$$\frac{\dot{Q}_D}{\dot{m}'_w} = \frac{\dot{Q}_D}{\dot{m}'_v} \cdot \frac{\dot{m}'_v}{\dot{m}'_w} = \frac{h_3 - h_1}{\bar{Y}_3 - \bar{Y}_1} = \frac{h'' - h'}{\bar{Y}'' - \bar{Y}'} \quad (2.15)$$

Pro výpočet výkonu sušení je potřeba znát určité údaje o sušeném materiálu a o prostředí, v kterém sušení probíhá.

Dále potřebujeme znát statiku sušení - vztahy mezi obsahem vlhkosti v sušeném materiálu a hodnotami sušícího prostředí při rovnovážném stavu (bez ohledu na čas).

Dynamiku sušení - změny rychlosti sušení vlivem různých teplot, relativní vlhkost, proudění. Změny postupu vlhkosti v sušeném materiálu. Vliv vlastností látky. Vlhkost – obsah vody vázané v materiálu jiným způsobem než chemicky.

Sušící prostředí – plynné prostředí a odvádějící páry vody ze sušeného materiálu. Nejčastěji teplý (horký) vzduch nebo směs vzduchu a spalin.

Výkonnost sušáren je množství odpařené vlhkosti za jednotku času což odpovídá hmotnostnímu průtoku. Z ekonomiky sušení plyne požadavek na co nejnižší náklady sušení, zejména náklady provozní. Hmotnostní průtok suchého materiálu \dot{m}_m [kg/h] je [5]:

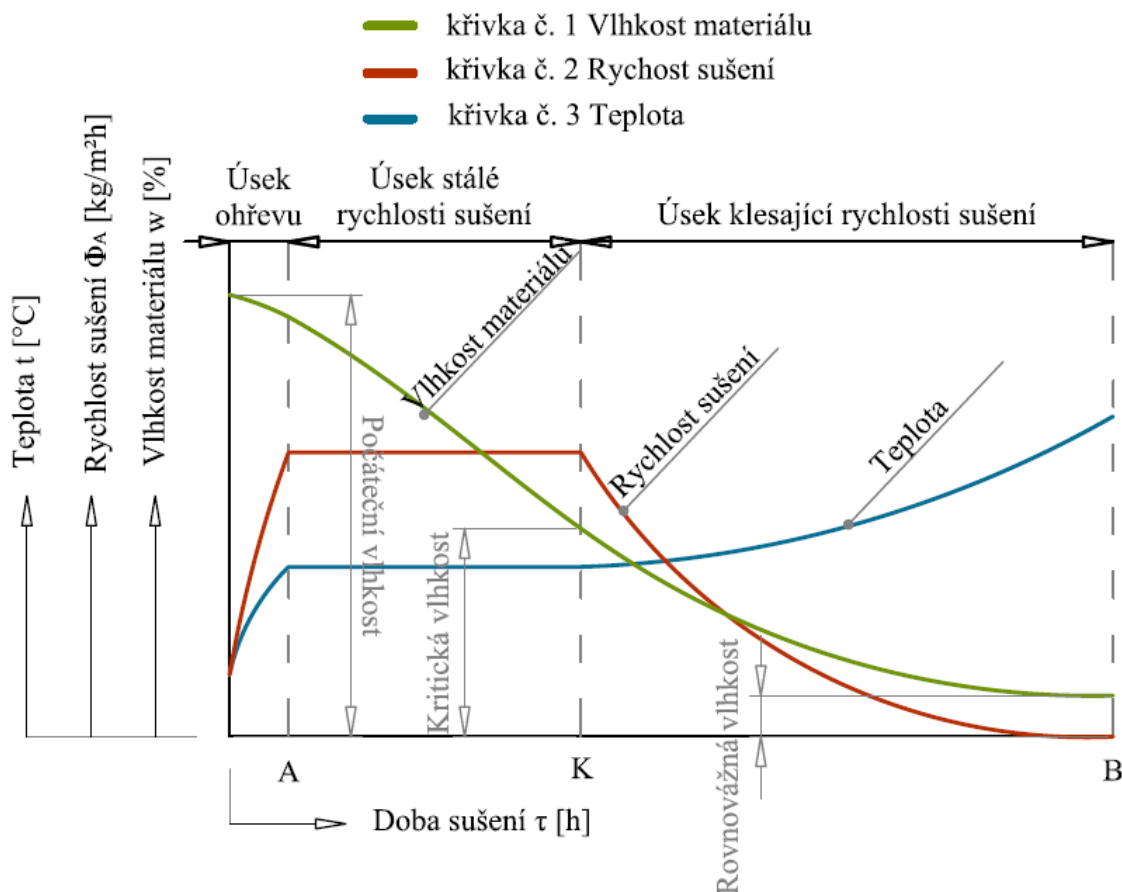
$$\dot{m}_m = \dot{m}_w (1 - \bar{X}_w) \quad (2.16)$$

Průběh sušení v závislosti na změně teploty, rychlosti sušení a vlhkosti materiálu lze názorně popsat podle časových průběhů zobrazených na obrázku 2.3.

První úsek je úsek ohřevu. Při kontaktu sušeného materiálu se sušicím médiem o vyšší teplotě a relativní vlhkosti nižší než 100 % nastává jeho zahřívání a současně vzrůstává rychlost sušení až k maximální hodnotě. Na konci tohoto úseku (v čase A) se ustálí teplota povrchu a tepelná rovnováha mezi množstvím tepla přijímaného materiálem a spotřebou tepla k odpařování vody. Pak nastává úsek stálé rychlosti sušení.

V úseku stálé rychlosti sušení je rychlost sušení konstantní a je rovna rychlosti odpařování vody z volného povrch kapaliny. V tomto úseku se vypařuje volná voda na povrchu materiálu, povrch však zůstává vlhký a odpařovaná voda se nahrazuje vodou přicházející vnitřkem materiálu. Teplota povrch sušeného materiálu, která se přibližně rovná teplotě mokrého teploměru (teplotě adiabatického nasycení vzduchu) se v tomto úseku mění (křivka 3). Tlak par nad povrchem materiálu se rovná parciálnímu tlaku nasycených vodních par při teplotě povrchu a nezáleží na vlhkosti sušeného materiálu. Toto údobí je nejdůležitější fází sušení, protože hrozí nebezpečí smrštění materiálu a vzniku napětí, musí být této fázi věnována velká pozornost zejména z hlediska teplotního průběhu. Při porušení rovnováhy mezi množstvím odpařované vody z povrchu a transportované k povrchu materiálu dochází k přesoušení povrchu, vytváří se velký rozdíl koncentrací vlhkosti a nastává porušování sušeného materiálu. Zůstane-li tato rovnováha zachována, rychlost se mění, pokud obsah vody v sušeném materiálu neklesne na kritickou vlhkost (v čase K) a na povrchu sušeného materiálu nedosáhne hygroskopické vlhkosti. Od tohoto okamžiku nastává pokles rychlosti sušení.

V úseku klesající rychlosti sušení dochází s klesající vlhkostí sušeného materiálu ke stálému poklesu rychlosti sušení (křivka 2), protože již není dostatek vlhkosti převáděné z vnitřku sušeného materiálu, povrch sušeného materiálu nepředstavuje volný povrch kapaliny a tlak par nad povrchem materiálu klesá. Impuls sušení, kterým je rozdíl tlaků mezi povrchem sušeného materiálu a sušicím médiem, ubývá a rychlost sušení klesá až na nulu (čas B). Tento stav nastane při dosažení vlhkosti rovnovážné, při které se tlak par nad povrchem sušeného materiálu rovná parciálnímu tlaku par v sušičce vzduchu [30].



Obr. 2.3 Průběh sušení - závislost doby sušení na časové změně vlhkosti, rychlosti sušení a teplotě [27]

Typy konvekčních sušáren:

a) Komorová (skříňová) sušárna

Sušárna, která má sušicí prostor ve tvaru komory, v které se materiál ukládá na zvláštní zařízení (regály, stojany s policemi, pojízdné regály s miskami, podvozky s plošinami apod.) a je obtékán sušicím médiem. Pro provoz sušárny je důležité rovnoměrné rozdělení sušicího média, protože celková doba sušení je dána dobou sušení v místě s nejnevhodnějším prouděním sušicího média [3]

b) Bubnová (rotační) sušárna

Tato sušárna je kontinuální zařízení, jehož hlavní částí je pomalu rotující válec (buben) o typickém průměru 2 až 3 m umístěný s mírným sklonem. Buben je uložen na vodících kladkách a otáčí se pomocí ozubeného kola umístěného na vnějším obvodu bubnu. V bubnu postupuje a přesypává se materiál, který je v kontaktu se sušicím plynem, a na konci bubnu materiál vypadává ve výsypce. Vestavby uvnitř sušárny umožňují zvětšit povrch styku sušeného materiálu a sušicího média. Bubnové sušárny se používají pro polydisperzní materiály o velikosti částic 0,1 – 100 mm vyžadující delší dobu sušení, například různé chemikálie a keramické materiály [2], [5].

c) Proudová (pneumatická) sušárna

Je to souproudé kontinuální zařízení. Vlhký materiál je dávkován šnekovým podavačem a unášen horkým vzduchem, který materiál suší. Rychlost vzduchu musí být vyšší než usazovací rychlost částic. V odlučovači (cyklónu) se odděluje suchý materiál a ventilátorem se odvádí vlhký vzduch. Často se instaluje částečný recykl sušeného materiálu z prvního stupně odlučovače částic. Proudová sušárna je vhodná pro jemnozrnné produkty vyžadující pouze několika sekundový styk mezi materiálem a sušicím plynem. Proto se tyto sušárny používají k sušení povrchové vlhkosti krystalů a neporézních částic (škrob, kvasinky, kostní moučka, polévky, částice polymeru, kaolín) [5].

d) Rozprašovací sušárna

Je tvořena svislým válcem s konickým zúžením v dolní části. Sušený materiál nebo jeho suspenze (např. prací prostředky, mléko, léčiva, vejce, škrob, káva) se rozprašuje pomocí sprchové růžice s tryskami nebo rychle se otáčejícího se kotouče do proudu horkého vzduchu. Rozprášené kapičky sušeného materiálu jsou malé (10 – 100 μm), mají rychlost až 100 m/s a odpařením kapaliny z nich vzniká jemný prášek. Vzduch mění v sušárně směr a podél pláště odchází přes cyklón nebo filtr ven. Sušení probíhá rychle, proto se zde mohou sušit i látky citlivé na teplo. Suchý práškový materiál se seškrabuje ze dna sušárny [5].

e) Fluidní sušárna

Při fluidním sušení vytváří částice zrnitého materiálu v sušárně vrstvu, která je aerodynamickým účinkem proudu sušícího prostředí udržovaná ve fluidním stavu. Pro fyzikální děj, probíhající v sušárnách tohoto typu, je charakteristická velká intenzita přestupu tepla a přenosu hmoty mezi pevným dispergovaným materiálem a sušicím prostředím, což je způsobeno zejména značně rozvinutým povrchem materiálu a jeho dokonalým stykem se sušicím prostředím. Svým charakterem se fluidní sušárny zařazují mezi sušárny pneumatické, přičemž sušící prostředí přetéká útvarem tuhých částic tvořící fluidní vrstvu mimovrstevnou rychlostí, která je větší než prahová rychlost fluidizace a menší než prahová rychlost úletu [3].

2.1.2 Kontaktní sušení

Kondukce (vedení) vzniká v důsledku pohybu a interakcí základních částic hmoty. Molekuly s vyšší kinetickou energií odevzdávají část své energie sousedním molekulám s nižší energií. Při vedení tepla dochází jen k přenosu energie, ne k přemísťování hmoty. V homogenním prostředí, které je dokonale tepelně izolováno od okolí, za předpokladu jednorozměrného šíření tepla (ve směru osy x), je v případě konstantního teplotního spádu $(t_1 - t_2)/l$ množství tepla Q prošlého rovinnou plochou S kolmou na osu x za dobu τ_t dáno vztahem

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{l} \cdot S \cdot \tau_t \quad (2.17)$$

kde λ [$J/m \cdot K \cdot s$] je koeficient tepelné vodivosti, charakterizuje schopnost látky vést teplo, závisí na teplotě (u kovů a kapalin klesá s rostoucí teplotou, u stavebních materiálů díky pórovitosti a vlhkosti roste, u plynů roste teplotou a tlakem), tlaku, pórovitosti (stavební materiály), u anizotropních látek i na směr. Nejvyšší je u čistých kovů (souvisí s velkým počtem volných elektronů), i malé množství příměsí výrazně snižuje λ . Není-li teplotní spád konstantní a teplo se šíří v kladném směru osy x , lze psát:

$$Q = -\lambda \cdot S \cdot \tau_t \cdot \frac{dt}{dx} . \quad (2.18)$$

Pro obecný směr šíření tepla je třeba nahradit derivaci parciálními derivacemi v jednotlivých souřadných osách, takže vektor hustoty tepelného toku je přímo úměrný gradientu teploty – Fourierův zákon:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T . \quad (2.19)$$

Tepelný odpor je v kontaktních sušárnách podstatně nižší než u konvekčních sušáren vzhledem k přenosu tepla vedením, tj. přímým kontaktem sušeného materiálu s vyhřívací plochou. K vyhřívání kontaktní plochy lze použít vodní páru, která při tom kondenzuje. Úkolem sušícího plynu je jen odvádění vlhkosti, takže lze využívat šetrné sušení teplotně citlivých látek za podtlaku. Sušáren s kontaktním přívodem tepla se používá také pro materiál ve formě nekonečných pásů.

K nejpoužívanějším kontaktním sušárnám patří sušárny válcové, bubnové, lopátkové a sublimační [2], [8].

a) Válcová sušárna

Sušený materiál je nanášen na topný buben např. nanášecími válečky, rozstříkem. U dvouválcové sušárny se suspenze může lít přímo do prostoru mezi válci. Rozvod páry i odvod kondenzátu je zajištěn osou bubnu. Válcové sušárny jsou obvykle atmosférické, i když existují i podtlaková provedení. Doba sušení se pohybuje od 2 do 10 vteřin při tloušťce vrstvy menší než 0,5 mm.

Tento typ sušáren je vhodný pro pastovité či kapalné látky (u dvouválcové sušárny též třeba pařené brambory), kvasnice, ovocné a zeleninové vločky, krmiva [2].

b) Bubnová sušárna

Uspořádání je prakticky totožné s bubnovou konvektivní sušárnou. Topným médiem je ale pára, vyhřívající trubky vedené vnitřkem bubnu. Protože tyto parní trubky rotují spolu s bubnem je, třeba páru i kondenzát vést rotačními rozvaděči. Bubnová sušárna je vhodná k sušení relativně křehkých krystalických materiálů a polymerů [2].

c) Lopatková sušárna

Typická vakuová sušárna, lopatky slouží k promísení sušeného materiálu. Otápí se vnější plášť sušárny. Používá se pro sušení barev, práškových kovů, acetátu celulózy, škrobu [2].

d) Sublimační sušárna

V první fázi se sušený materiál zmrazí (vysoká rychlost zmrazování vytváří malé ledové krystalky, které nepoškozují strukturu buněk). Zmrazuje se buď proudem vzduchu, chlazením kontaktních ploch, kapalnými plyny nebo vakuovým chlazením. Ve druhé fázi dochází k sublimaci ledu v komorách nebo tunelech, zpravidla za sníženého tlaku 10 – 100 Pa. Během sublimace se přivádí teplo z kontaktních ploch (ale existují i varianty s infra nebo mikrovlnným ohřevem). Při zahřívání nesmí dojít k překročení teploty tání ledu. Tento typ sušárny je energeticky i investičně nejnáročnější (součet energie potřebné na zmrazení a sublimaci je vždy větší než pouhé odpaření). Sušárny se používají při extrémních nárocích na kvalitu zpracování (čaj, káva, luštěniny, krevní plasma, ovoce, zelenina, zeleninové šťávy, žampiony) [2].

2.1.3 Radiační sušení

Radiace (záření, sálání) tepla je realizována prostřednictvím elektromagnetického vlnění, resp. pomocí elementárních částic (fotonů). Tepelná radiace nevyžaduje hmotné prostředí, může se šířit i ve vakuu (rychlostí světla). Každé těleso, kapalné i pevné, je zdrojem elektromagnetického vlnění, tzv. tepelného záření, vznikajícího v důsledku kmitání nabitých částic, z nichž se těleso skládá. Tělesa s teplotou menší než 500 až 560 °C vyzařují infračervené záření. S rostoucí teplotou stoupá celkové množství tělesem vyzařené energie a záření se přesouvá do oboru kratších vlnových délek, viz Stefan - Boltzmannův zákon vyzařování (2.20) a Wienův posunovací zákon (2.21). Za tepelné záření v užším slova smyslu pokládáme elektromagnetické záření s vlnovými délkami v rozmezí 10 až $340 \cdot 10^{-6}$ m.

Při interakci záření s látkou dochází ke třem jevům: část záření se odrazí, část se pohltí a část projde. V ideálním případě, kdy se všechna energie přenáší pouze jediným způsobem dělíme tělesa na dokonale černá (vše absorbuje), dokonale bílá (vše odráží) a dokonale průhledná (vše propouští).

$$M_e = \sigma \cdot T^4 \quad (2.20)$$

Stefan–Boltzmannův zákon pro intenzitu vyzařování černého tělesa: intenzita vyzařování černého tělesa M_e [W/m²] roste přímo úměrně se čtvrtou mocninou termodynamické teploty tělesa T [K], $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m².K⁴] – Stefan Boltzmanova konstanta

$$\lambda_{\max} = \frac{b_w}{T} \quad (2.21)$$

Wienův posunovací zákon pro tepelné záření černého tělesa: vlnová délka maxima vyzařování λ_{\max} [m], na niž připadá maximum vyzařování černého tělesa, je nepřímo úměrná jeho termodynamické teplotě, s rostoucí teplotou černého tělesa se maximum posouvá směrem k menším vlnovým délkám. Wienova konstanta $b_w = 2,9 \cdot 10^{-3}$ [m·K].

Typy radiačních sušáren:

a) Sušárny používající infračervené záření

Infračervené záření způsobuje povrchový ohřev sušeného materiálu. Záření je emitováno odporově vyhřívanými topnými tělisky nebo porézními keramickými tělisky, na nichž probíhá katalytické spalování plynu. Sušárny se často kombinují s tryskovým konvektivním sušením. Používá se pro dosušování nátěrů, automobilů, papíru, textilu, ovoce, zeleniny, kakaových bobů, zrní [2], [5].

b) Mikrovlnné sušárny

Technologie mikrovlnného ohřevu (při frekvencích 915 nebo 2450 MHz) se uplatňuje při sušení materiálů citlivých na mechanické namáhání a teplotu a při dosušování materiálů. Při vakuovém mikrovlnném sušení ovoce se zachovává jeho barva a chuť. Mikrovlnný ohřev je citlivý na obsah vody v materiálu – k nejrychlejší lokální generaci tepla dochází tam, kde je dostatek volné vody, a proto se využívá při sušení materiálů s buněčnou strukturou, např. dřeva. Mikrovlnné sušení je vhodné především pro materiály s nízkou vlhkostí (kůže, keramika, ovoce, rýže, tabák, těstoviny, nátěry, lepidla, papír, PVC, polypropylen, polymidy) [2], [5].

2.2 Metody sušení

2.2.1 Lyofilizace

Proces lyofilizace neboli vakuového vymrazování se skládá ze zmrazení materiálu, primárního sušení a sekundárního sušení.

Objekt je zmrazen mechanickou refrigerací suchým ledem a metanolem nebo tekutým dusíkem. Ve větším měřítku je zmrazování obvykle prováděno v “freeze-drying” přístroji. Zde je nutné provést zmrazování materiálu na teplotu, která se nachází pod eutektickým bodem, tedy teplotu, při které může existovat jen v pevném skupenství. Zmrazování materiálu pod tuto teplotu zajistí, že bude docházet k sublimaci namísto tání. Větší krystaly je snazší vakuově vymrazit. K vytvoření větších krystalů může být materiál zmrazován pomaleji nebo může být teplota zvyšována a snižována v cyklech. Tento proces se nazývá žihání.

Během fáze primárního sušení je snížen tlak a je dodáno potřebné teplo k započetí sublimace. V primární fázi sušení je odstraněno až 98 % vody. Sušení může být pomalé z důvodu nenarušení struktury materiálu. Teplota v kondenzátoru se často pohybuje pod -50 °C.

Sekundární sušení je zaměřeno na sublimaci zbylé vody, zejména zbývajících nezmrzlých molekul vody, které se drží na povrchu pevných látek díky adsorpci. V této fázi je teplota zvyšována na větší hodnoty, než tomu bylo v případě primárního sušení. Obvykle je snižován tlak, z důvodu podpory sublimace. Po dokončení sekundární fáze sušení zůstává v materiálu 1-4 % vody.

Vakuové vymrazování se používá v mnoha rozličných odvětvích. Ve farmaceutickém průmyslu se používá pro výrobu vakcín, léků, biologických derivátů. V potravinářském průmyslu je tento proces využíván na sušení různých potravin. Využití je zejména tam, kde je potřeba redukovat váhu, což je například v astronautice. Uplatnění je také v technologickém průmyslu, na výrobu chemických syntetických materiálů nebo bioseparaci [1].

2.2.2 Vakuové sušení

Vakuové sušení je proces, ve kterém je materiál sušen v prostředí se sníženým tlakem. Díky nižšímu tlaku můžeme snížit dodávané teplo potřebné k usušení materiálu. Navzdory názvu, proces neprobíhá v opravdovém vakuu. Tlak v prostorách sušení se pohybuje od 613 Pa do $1,3 \cdot 10^{-8}$ Pa (základní vakuum do absolutního tlaku 613 Pa, přechodové vakuum 1,3 Pa, vysoké vakuum $1,3 \cdot 10^{-3}$ Pa, ultravakuum $1,3 \cdot 10^{-8}$ Pa). Většina průmyslových vakuových sušáren pracuje v oblasti základního vakua do absolutního tlaku 613 Pa. V oblasti přechodového vakua pracují sublimační sušárny.

Nejjednodušší, skříňové vakuové sušárny jsou tvořené izolovanou, žebry vyztuženou skříní s vyhřívanými policemi. Na ty se ukládají misky obsahující vysoušený materiál. Vnitřek komory je přístupný těsnými dveřmi, u větších komor jsou dvojce dveře, takže komory jsou průchodné.

Vakuové trubkové sušárny s uvnitř vyhřívanými trubkami jsou často používány. Ve válcové komoře rotuje vyhřívaný svazek trubek. Průměr komor u vakuových

trubkových sušáren se pohybuje od 650 do 3 000 mm, délka od 2 000 do 12 000 mm. Tento typ aparátů se používá pro sypký nelepivý materiál, zejména pro látky s hrubšími částicemi (acetát celulózy, dextrín, mouka apod.). Pro látky mající sklon k nalepování, se konstruují sušárny s dvěma rotujícími, do sebe zasahujícími svazky trubek [3].

2.2.3 Horkovzdušné sušení

Pro přenos energie na povrch sušeného materiálu se používá zahřátý vzduch (konvekce). Přenos energie uvnitř sušeného materiálu probíhá kondukcí. Voda je desorbována sušícími plyny na povrchu, ustaví se gradient vlhkosti a molekuly kapalné vody difundují na povrch. Profily teploty a vlhkosti materiálem určují rychlost difúze kapalné vody na povrch. Teplota vzduchu, vlhkost a koncentrace vody na povrchu materiálu určují rychlost desorpce vody z materiálu. Jestliže rychlost odpařování vody z povrchu nepřekročí rychlost difúze kapalné vody materiálem k jeho povrchu, pak je rychlost celkového sušení konstantní. Jestliže rychlost difúze klesá pod hranici rychlosti desorpce, tak se stává hraničním dějem sušení difúze a nastupuje období klesající rychlosti sušení. Se zvýšením teploty sušícího plynu se zvyšuje rychlost desorpce vody z povrchu sušeného materiálu a výsledkem toho je vyšší gradient vlhkosti uvnitř.

2.2.4 Mikrovlnné sušení

Mikrovlnný ohřev je jednou z možností jak nedestruktivním způsobem snížit obsah volné vody v materiálu. Výhodou metody založené na mikrovlnném ohřevu je redukce vlhkosti v materiálu v relativně velmi krátkém časovém úseku. Přínosem je prostorová nenáročnost a použití metody na stávající materiál bez zásahu do něj. Materiál obsahující volnou vodu absorbuje energii mikrovln s následným zvýšením teploty a expanzí vodní páry do okolí. Po vstupu mikrovlnné energie do materiálu zde dochází k velmi rychlým změnám polarity molekul volně vázané vody. Tyto změny mají za následek tření molekul a vznik tepelné energie. Díky vzniklé energii dojde k fázovému přechodu z jednoho skupenství do druhého. Ve srovnání s jinými metodami sušení, které materiál ovlivňují převážně povrchově, mikrovlnný ohřev působí v celém objemu materiálu, přímo na molekuly vody a na organismy vodu obsahující (sterilizace ohřevem).

3 Sušení čistírenských kalů

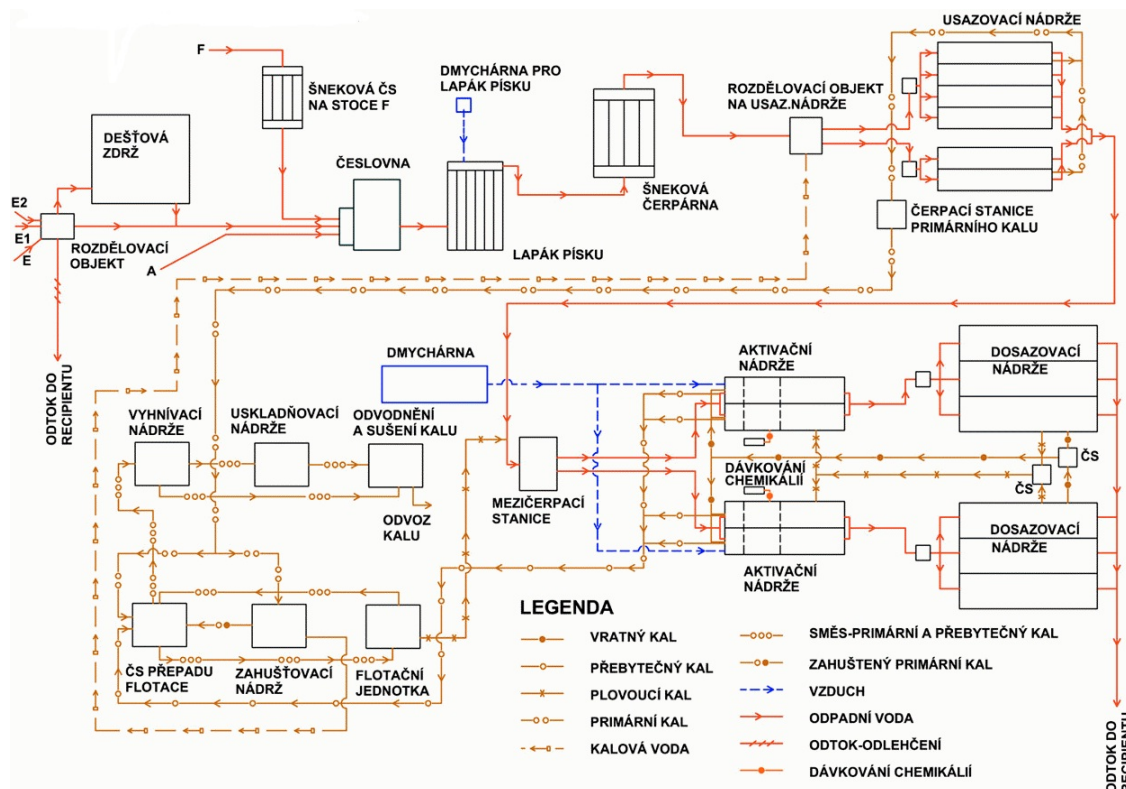
3.1 Čistírna odpadních vod

Čistírna odpadních vod (ČOV) je zařízení určené k separaci znečišťujících látek a vody. Všechna voda, ať už má původ v průmyslu, voda splašková (municipální) nebo i přírodní voda, vždy obsahuje určité množství nečistot. Podle dalšího způsobu nakládání s vodou je potřeba toto znečištění odstranit. V čistírenském odvětví se používá nesčetné množství aparátů, které mohou být individuálně uspořádány. Jedno z mnoha uspořádání můžeme vidět na obrázku 3.1, které je použito na současné čistírně odpadních vod v Brně Modřicích.

Čištění odpadních vod, různého složení, může být rozděleno do dvou nebo do tří fází. První fází je však vždy mechanické čištění, na které následně navazuje fáze biologická. Třetí stupeň je chemický, při kterém dochází k finálnímu dočištění odpadní vody (např. snížení či odbourávání obsahu hlavních nutrientů, tj. dusíku a fosforu).

Voda je přiváděna do čistírny stokou přes česle, které zachycují plovoucí a unešené nečistoty velkých rozměrů (části dřevin, uhynulá zvířata, kameny), které by mohly poničit následující zařízení. Za česlemi mohou být umístěna síta a mikrosíta, pro zachycení částic menších rozměrů, než tomu bývá u česlí. Následují lapáky písku, které slouží k zachycování látek sunutých po dně, a to nejčastěji písku a šterku. Dalším zařízením může být lapák tuku, který zachycuje látky s nižší hustotou, než je hustota vody. Posledním zařízením mechanického stupně jsou usazovací nádrže, kde dochází k sedimentaci nerozpuštěných látek a vzniká tak primární kal.

Základem biologického čištění jsou biochemické oxidačně-redukční reakce, kde rozhodujícím faktorem je akceptor elektronu. Rozdělení biologických procesů lze provést pomocí přítomnosti O_2 nebo NO_3^- . Oxická oblast neboli kyslíkatá je oblast, kde probíhá oxidace organických látek a zároveň i nitrifikace. V anoxické oblasti zvané též bezkyslíkatá již není přítomen rozpuštěný kyslík, obsahuje pouze rozpuštěný NO_3^- . Anaerobní oblast je oblastí dalšího rozkladu látek, depolymerace polyfosfátů, přítomen není ani O_2 ani NO_3^- [10].



Obr. 3.1 Blokové schéma ČOV Modřice [33]

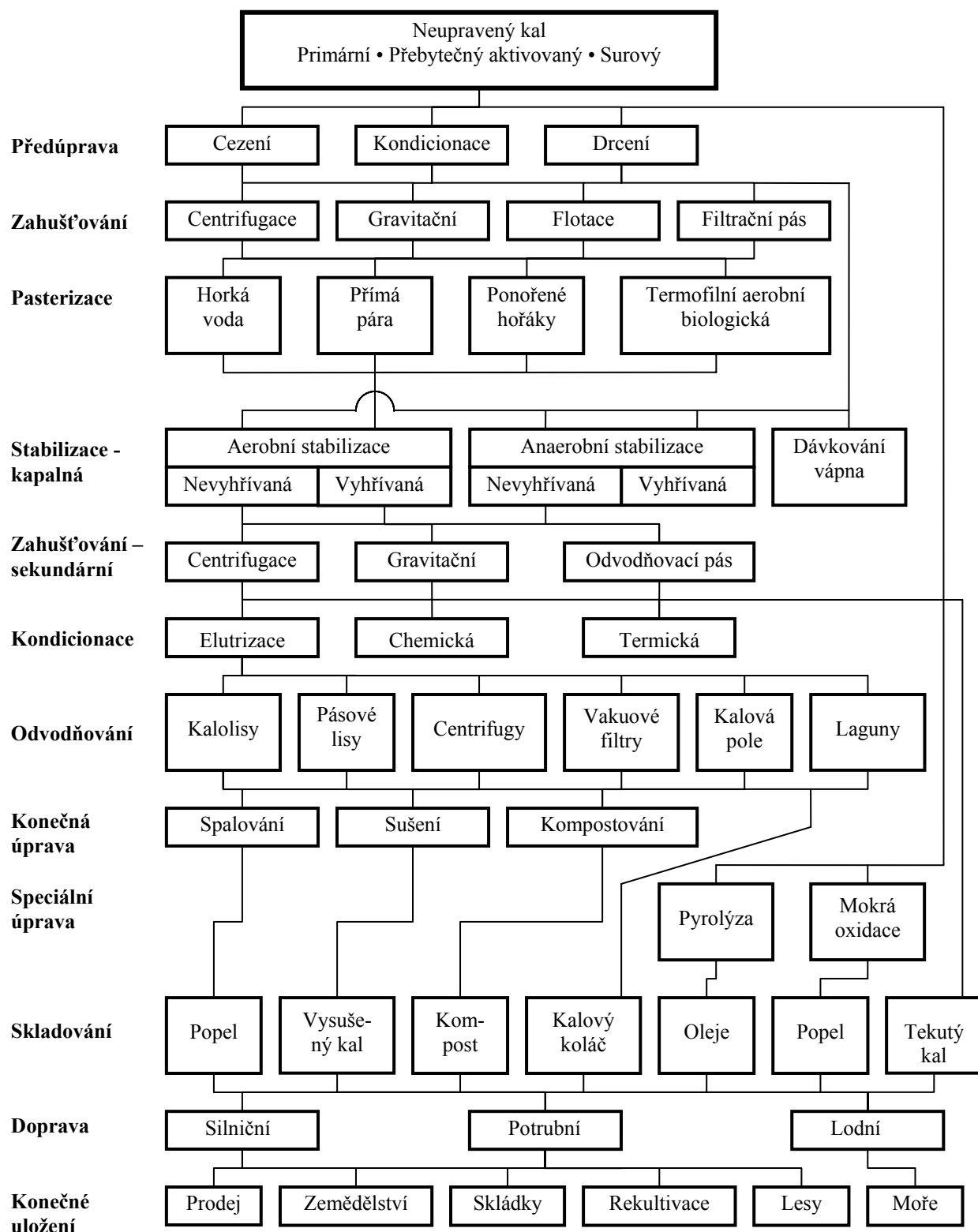
3.1.1 Kalové hospodářství

Norma, která předepisuje a stanovuje zásady pro navrhování a výstavbu zařízení kalového hospodářství městských čistíren odpadních vod pro více než 50 EO je ČSN EN 12255-8 (75 6403).

V normě jsou vysvětleny základní pojmy, termíny a definice, požadavky na technické postupy (zahušťování, hygienizace, stabilizace a pseudostabilizace, odvodnění kalu, kompostování, manipulace a skladování), zásady navrhování (teoretická životnost, potrubí, kalová čerpadla) a bezpečnost.

a) Zpracování a uskladňování kalu

Jak bude kal zpracován nebo uskladněn, je závislé na jeho dalším využití. Zpracování a skladování je omezeno mnoha předpisy a nařízeními, které přímo souvisí s lokací čistírny a způsobem využití či odstranění kalu. Při výstavbě nových čistíren nebo při rekonstrukcích stávajících, je nutné, aby došlo k posouzení vlivu na životní prostředí. Způsob a metoda zpracování kalu přímo souvisí s několika faktory, kterými jsou zejména velikost ČOV, vlastnosti a druh zpracovávaného kalu a zejména konečné využití či odstranění kalu. Metody využití či odstranění kalu jsou vybírány na základě umožnění vícenásobného využití či odstranění a na možnosti širokého rozsahu metod zpracování kalu.

Návrh experimentální solární sušárny

Obr. 3.2 Přehled metod úpravy a zpracování kalů [10]

b) Zahušťování kalu

Zahušťování kalů se praktikuje zejména z důvodu snížení objemu a nákladů na dopravu. K zahušťování kalů se používají různorodá zařízení. K nejčastějším takovým zařízením patří: kruhový či šnekový zahušťovač kalu, gravitační zahušťovače, odstředivky nebo různá flotační zařízení, tato zařízení mohou pracovat buďto kontinuálně nebo diskontinuálně-přerušovaně. Výběr metody zahušťování je ovlivněn několika jmenovanými faktory[32]:

- koncentrace kalu požadovaná při následujících procesech
- účinnost odvodnění
- schopnost rozkladu fosforu v gravitačních zahušťovačích
- dobu zdržení, která v případě, že je delší než jeden den, může způsobit anaerobní rozklad spojený s emisemi pachů, tvorbou pěny, bytněním kalu a zhoršením schopnosti odvodnění
- řízení přívodu kalu a odvodu kalové vody
- uskladňování a řízení odvodu kalové vody v případě nutnosti nitrifikace a denitrifikace.

c) Dezinfekce kalu

Dezinfekce nebo též hygienizace kalu je proces, při kterém dochází ke snížení bakteriální kontaminaci neboli k likvidaci mikroorganismů obsažených v kalu. Hygienizace se provádí následujícími způsoby či metodami [32]:

- termofilní aerobní stabilizace
- tepelné zpracování, např. zahřívání, tepelné vysoušení
- termofilní aerobní stabilizace jako předčištění před mezofilní anaerobní stabilizací (vyháněním)
- termofilní anaerobní stabilizace jako předčištění před mezofilní anaerobní stabilizací (vyháněním)
- kompostování
- přidávání vápna k tekutému nebo odvodněnému kalu (kalovému koláči)
- mezofilní anaerobní stabilizace (vyháněním) v kombinaci s dlouhodobým skladováním.

d) Stabilizace kalu

Stabilizace kalu se používá ke snížení či úplnému odbourání nebezpečných součástí obsažených v kalu. Stabilizací kalu se rozumí odstranění toxinů, patogenů, organických součástí a zápachu, tedy všech nepříjemných složek. Stabilizace může být aerobní či anaerobní, tedy za přístupu vzduchu nebo bez přístupu.

V závislosti na tom, zda je zařízení vyhříváno či není, je navrhování zařízení pro anaerobní stabilizaci kalu ovlivňováno danými faktory (nutný stupeň odbourání; odbouratelnost; provozní teplota; řízení teploty; hydraulická doba zdržení; průměrné a maximální zatížení kalu (přítok surového kalu); rozměry anaerobního reaktoru (vyháněcí nádrže); jedno nebo vícestupňový proces anaerobní stabilizace; produkce bioplynu (průměrné a maximální); uskladňování a využívání bioplynu; limitní hodnoty pro emise bioplynu; limitní hodnoty pro emise pachů a jejich kontrola; četnost přivádění surového kalu; opatření k minimalizaci tvorby kalového stropu a pěny, jakož i k odstraňování plovoucích látek a pěny; promíchávání obsahu anaerobního reaktoru;

zkratové proudy a mrtvé zóny; energie ($\text{Wh/m}^3 \cdot \text{d}$) a výkon (intenzita) (W/m^3) pro míchání kalu; tepelná izolace. Průměrná hodnota sušiny surového kalu má být minimálně 4% (viz EN 12880) [32].

Studené vyhívání:

Studené vyhívání je takové vyhívání, které probíhá dlouhodobě a v tekutém stavu. Je to pomalý proces, při kterém dochází k velmi pozvolnému odbourávání organických součástí kalu. Výše odstranění je přímo závislá na celkové době uskladnění. V oblastech s nižší teplotou okolí je tato metoda kontra-efektivní.

Otevřené vyhívání surového kalu má být používáno pouze u čistíren odpadních vod menších než pro 1000 EO a jen tam, kde pachové emise, jiné pachové látky a metan jsou pro životní prostředí přijatelné [32].

Anaerobní stabilizace (vyhívání):

Vyšší míra stabilizace kalu a řízení procesu je hlavním důvodem, který řadí vyhřívání před vyhívání studené. Je to z důvodu efektivnějšího a rychlejšího zneškodnění organických součástí kalu.

Aerobní stabilizace:

Při aerobní stabilizaci kalu vzniká teplo, které je následkem rozkladem organické hmoty a dochází tak zároveň k hygienizaci. Takto stabilizovaný kal lze použít na hnojení zemědělské půdy. Stabilizace obvykle probíhá v uzavřených nádržích.[32].

e) Odvodňování kalu

Odvodňování kalů se provádí za účelem snížení celkového objemu kalu a tím ke snížení provozních nákladů a nákladů na dopravu. K odvodňování dochází na kalových polích nebo strojně.

Kalová pole, nejstarší způsob odvodňování, jsou otevřené nádrže vybavené drenážním systémem. Filtrační lože se obvykle sestává z více písčných a štěrkových vrstev, přičemž se velikost zrna zvětšuje od vrchní vrstvy ke spodní [32]. Tento způsob odvodňování je přímo závislý na klimatických podmínkách v místě zřízení kalového pole.

Strojní odvodňování je opět mnohem efektivnější, než jsou kalová pole. Strojní odvodňování může probíhat mechanicky nebo termicky. Mechanické odvodňování je energeticky výhodnější. Zařízení, která lze použít pro odvodnění jsou následující [32]:

- pásové filtrační lisy
- odstředivky
- komorové filtrační lisy (kalolisy)
- membránové filtrační lisy.

f) Kompostování

Rozklad pevné organické hmoty za přístupu vzduchu je nazýván kompostováním. Vlivem působení bakterií, hub a jiných vlivů dochází k přeměně humusu. Kompostováním lze dosáhnout snížení nežádoucích organických součástí (hygienizaci), k redukci zápachu, ale i k redukci obsažené vody

g) Manipulace a skladování

Ke skladování kalů dochází v kalových nádržích, jímkách či lagunách. Skladování závisí na specifikaci kalu, zejména z hlediska obsahu vody. Odvodněný kal se skladuje na zpevněných kalových úložištích nebo v kalových silech [32].

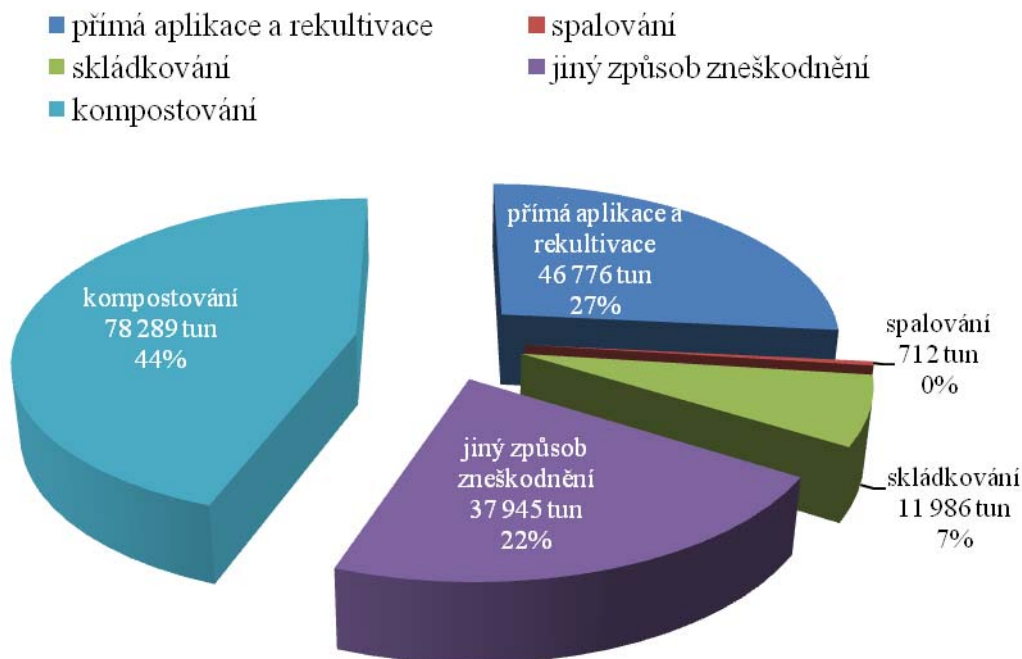
h) Bezpečnost

Co se týče bezpečnosti, je nutno brát v úvahu možné nebezpečí plynoucích z tvorby toxických nebo výbušných plynů. Musí být prováděna vhodná opatření pro zajištění dostatečně přirozeného nebo nuceného větrání a/nebo nevýbušné strojně-technologické zařízení [32].

Jak z předchozího výčtu z normy vyplývá, kalové hospodářství je neoddělitelnou součástí čištění odpadních vod. Kal, jako odpad z procesu čištění vod, je nutno nějakým způsobem zpracovat, zlikvidovat nebo využít. Podle dalšího způsobu nakládání se kal dále upravuje. Na schématu na obrázku (obr. 3.2) můžeme názorně vidět jednotlivé úpravy kalů. Další nakládání s kalem je ovlivněno jeho základní charakteristikou, což je obsah sušiny, organiky, patogenů, těžkých kovů. Obsah sušiny se stanovuje hmotnostním podílem odpaření vody při 105 °C. Primární kal obvykle obsahuje 2,5 % sušiny. Sekundární kal 0,5-1%, zahuštěním lze zvýšit obsah sušiny na 4-6 %. Po stabilizaci a odvodnění již kal není tekutý a obsahuje 20-40 % sušiny. Termickými procesy lze zvýšit obsah sušiny v kalu až na 90 % [10].

V současnosti je nejvyužívanější úpravou surového kalu jeho anaerobní stabilizace za vzniku bioplynu a stabilizovaného kalu. Ten se nejčastěji využívá ke kompostování a k rekultivacím. Bioplyn je zpravidla využíván k pokrytí tepelných nároků vlastního procesu anaerobní stabilizace energetických nároků ČOV [28].

Způsob zneškodnění kalu v roce 2008 na území ČR (175 708 tun/rok)



Obr. 3.3 Způsob nakládání s kalem v roce 2008 v ČR [28]

V České republice se v roce 2008 v komunálních ČOV vyprodukovalo 175 708 tun sušiny kalu (obr. 3.3). Největší procento bylo využito na kompostování, nejméně se kalu spaluje. Světový trend je v upuštění od skládkování a využívání kalů v zemědělství. Naopak je snaha kal energeticky využít.

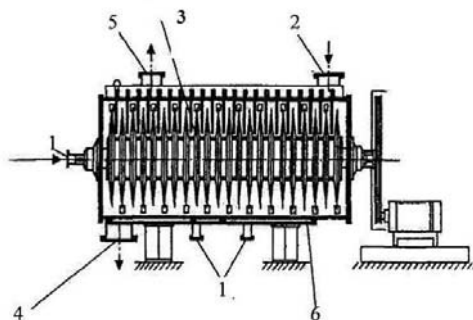
3.2 Sušení čistírenských kalů

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1, sušení lze provádět třemi způsoby. Kontaktním, konvekčním nebo radiačním způsobem. Na kontaktním principu, tedy principu, kdy se přenáší teplo do vysoušeného kalu přes vyhřívané plochy, pracují diskové sušárny. Konvekční sušárny pracující na principu, kde se vysoušecí médium (vzduch, inertní plyn, spalin nebo přehřátá vodní pára) dostává do přímé konfrontace se sušeným materiálem.

3.2.1 Kontaktní sušení čistírenských kalů

Typickým představitelem kontaktní metody sušení kalů jsou diskové sušárny (obr. 3.4). Základním konstrukčním prvkem je válcové těleso sušárny, jehož vnitřní vyhřívané žebrované tvoří stator diskové sušárny. Vyhřívaný rotor slouží k provzdušňování, kypření a transportu sušeného kalu. Systém stěrek a lopatek zabraňuje tvoření nápeků na vyhřívaných plochách. Neustálý kontakt mezi vyhřívanými plochami

a sušeným kalem zaručuje vysokou účinnost sušicího procesu. Diskové sušárny umožňují zpracování jak vyhnílého tak nevyhnílého kalu z čistíren odpadních vod [11].



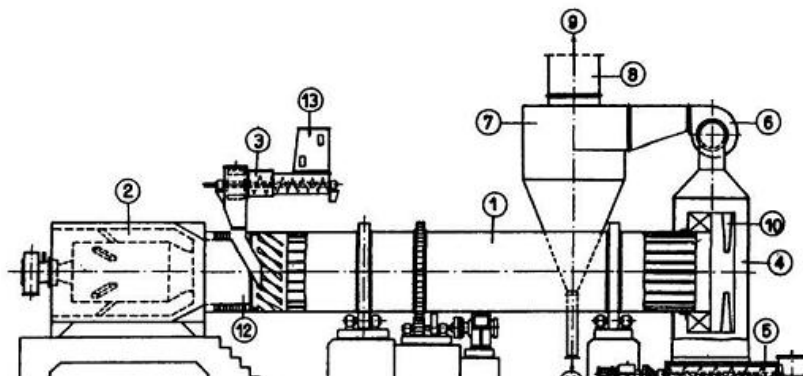
Obr. 3.4 Disková sušárna

1-přívod páry, 2-přívod odvodněného kalu, 3-disky vyhříváné párou – rotor sušárny, 4-výstup usušeného kalu, 5-odtah brýd, 6-plášť sušárny

3.2.2 Konvekční sušení čistírenských kalů

a) Rotační bubnová sušárna

Kal je přiváděn do sušárny z jedné strany (obr. 3.5) a prostřednictvím rotace bubnu a jeho vnitřku je přetransportován na druhý konec. Současně přichází do kontaktu s velmi horkým plynem. Výsledkem je granulovaný kal s obsahem sušiny větším než 90 %. Jako prevence proti ulpívání nálepů na stěnách bubnu musí mít přiváděný materiál obsah sušiny vyšší než 65 %. Proto je běžné, že vstupu kalu do sušárny předchází míšení sušeného kalu s kalem odvodněným [11].

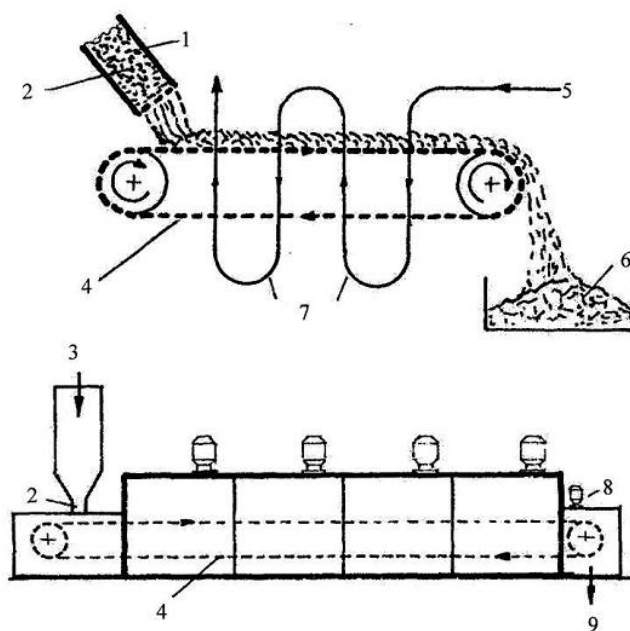


Obr 3.5 Rotační bubnová sušárna

1-buben sušárny, 2-hořák nebo ohřívák vzduchu, 3-dopravník kalů, 4-zásobník sušeného kalu, 5-šnekový vynašeč suchého kalu, 6-ventilátor, 7-odlučovač prachu, 8-odvod brýd, 9-odtah, 10-hradicí zařízení, 11-prach, 12-napojení zdroje tepla k bubnu, 13-zásobník odvodněného kalu, 14-usušený granulát

b) Pásové sušárny

U horizontálních pásových sušáren (obr. 3.6) je odvodněný čistírenský kal k sušení rozprostřen na pásu, který se pomalu pohybuje v proudu teplotního média (spaliny, horký vzduch, výfukové plyny). Aby byl umožněn kontakt mezi vysoušeným kalem a sušícím vzduchem, bývá dopravní pás prodyšný. Protože v průběhu sušení není vysoušený kal mechanicky namáhán, je podíl prachových částic v odtahovém plynu zvláště malý. V procesu lze využívat i zdrojů tepla s nižšími teplotními úrovněmi. Dle použití a konstrukce existují pásy textilní (tkané i netkané), kovové (perforované či tkané z ocelových vláken) a pásy na bázi plastických hmot. Použití určitého typu pásu je v první řadě odvislé od teploty sušícího média a tím i zdroje tepla. Dle způsobu přívodu sušícího vzduchu se pásové sušárny dělí na sušárny s přívodem média pod pás nebo nad pás. Vysoušecí médium proudí podél nebo proti směru pohybu pásu s vysoušeným kalem pro dosažení maximálního vysoušecího efektu. Z dispozičních důvodů (úspora zastavěné plochy) využívají sušárny různé uspořádání pásových systémů a v praxi se vyskytují jednopásové, dvoupásové i vícepásové systémy, přičemž jsou pásy umístěny nad sebou. Metoda pásových sušáren umožňuje tak vícenásobné využití tepelného média a vyznačuje se nízkými náklady na údržbu [11].



Obr 3.6 Pásová sušárna

1-odvodněný kal, 2-dávkování kalu na pás, 3-zásobník odvodněného kalu, 4-perforovaný sušící pás, 5-vysoušecí plyn, 6-zásobník vysoušeného granulátu, 7-uspořádání proudu plynu, 8-pohon pásu, 9-vysoušený granulát

c) Fluidní sušárna

Ve fluidní sušárně je intenzivní kontakt realizován prostřednictvím stoupajícího proudu plynů vytvářeného vysokou turbulencí, který nese částice kalu až do jejich usušení. V závislosti na typu kalu se pohybuje obsah sušiny usušeného kalu ve formě bezprašných granulí kolem 90 %. Prach je proudem plynu transportován do cyklónu a

po smíšení s odvodněným kalem se vrací zpátky do sušárny. Ve fluidní vrstvě může být rovněž umístěn tepelný výměník [11].

3.3 Vlastnosti čistírenských kalů

Potřeba znalosti jednotlivých vlastností kalů a jim odpovídajících metod stanovení se odvíjí i od použitých technologických postupů jejich zpracování a zneškodňování. Podle toho můžeme rozdělit tyto vlastnosti do následujících skupin podle tabulky Tab. 3.7 [29]:

Skupina	Charakteristika	Provozní využití	Symbol	Parametr
I	Základní	bilanční hodnocení provozů	SC	celková sušina 105°C
			ZŽ	ztráta žháním 550°C
			RL	rozpuštěné látky
			NL	nerozpuštěné látky
			pH	Log (aktivity vodíkových iontů)
			KNK	kyselá neutralizační kapacita (alkalita)
II	Fyzikální	separace NL		zahušťovací křivky
		zahušťování		spec. filtrační odpor
		odvodňování		spec. odvod. schop. metodou CST
III	Kontaminanty	kontrola technolog. Procesů		těžké kovy (Cd, Hg, Pb, Cu, Cr, Zn, Ni, Va, Mo)
		limity pro následné využití kalů		organické látky AOX, PCB, PAV, dioxiny, benzofurany
IV	Makroprvky	agrochemické využití (přímé, komposty)		N, P, C, Ca, Mg, K
V	Mikrobiologické	limity pro následné využití kalů		enterokoky, termotolerantní koliformní, Salmonella sp.

Tab. 3.7 Použitých technologických postupů zpracování a zneškodňování čistírenských kalů [29]

Čistírenské kaly jsou heterogenní suspenze s obsahem pevných částic, nejčastěji v rozmezí 3 – 6 % hm. Vlastnosti kalů se liší podle druhu (primární, aktivovaný, směsný surový atd.) a také podle původu, protože na jednotlivých čistírnách je produkován kal s odlišnými vlastnostmi.

Mezi nejdůležitější termofyzikální vlastnosti kalů patří měrná tepelná kapacita, hustota a dynamická viskozita.

Měrná tepelná kapacita kalu není příliš závislá na teplotě, a díky malému obsahu pevných částic, jsou její hodnoty srovnatelné s vodou.

Hustota kalu je závislá na teplotě – se zvyšující se teplotou hustota klesá. Její hodnoty jsou cca o 1 – 2 % vyšší než u vody v závislosti na původu a druhu kalu.

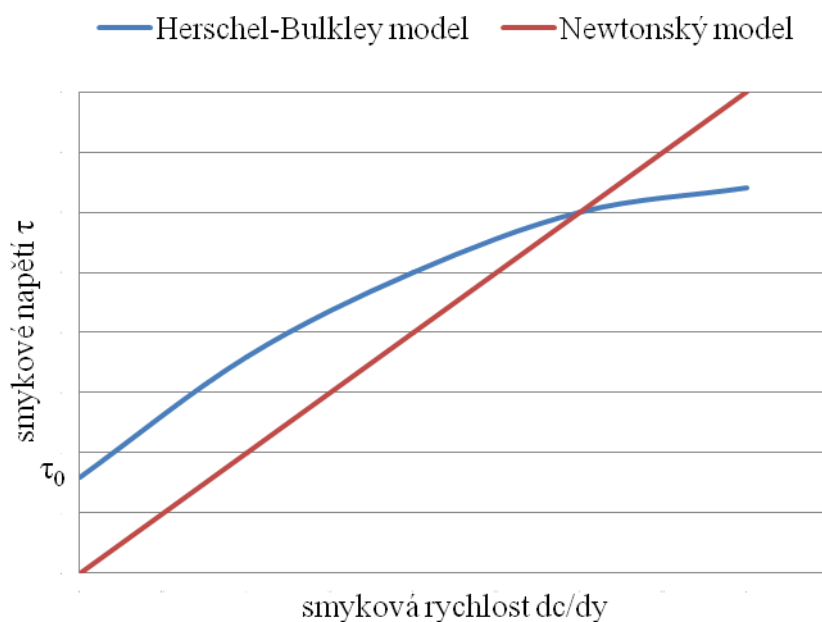
Z hlediska dynamické viskozity je významné to, že čistírenské kaly patří do skupiny nenewtonských kapalin. Pouze kaly s obsahem sušiny pod 2 % je možné považovat za newtonskou kapalinu [25].

Pro newtonské kapaliny je dynamická viskozita η látkovou konstantou. Dynamická viskozita η je Newtonovou rovnicí (3.1) vyjádřena jako směrnice přímky, která určuje závislost mezi smykovým napětím d_y a smykovou rychlostí d_c .

$$\tau = \eta \cdot \frac{dc}{dy} \quad (3.1)$$

Pro nenewtonské kapaliny se používá pojem zdánlivá viskozita, která již není látkovou konstantou a je závislá na smykovém napětí. Pro popis chování nenewtonských kapalin existuje několik modelů, např. Ostwald-Waleův model, Binghamův model, Backley - Herschelův model a další. Čistírenským kalům nejlépe odpovídá model Herschel-Bulkley [14], který je charakteristický počátečním smykovým napětím τ_0 a jeho nelineární závislostí na smykové rychlosti. Toková křivka tohoto modelu je patrná z reogramu na obr. 3.8. Křivka je popsána rovnicí (3.2):

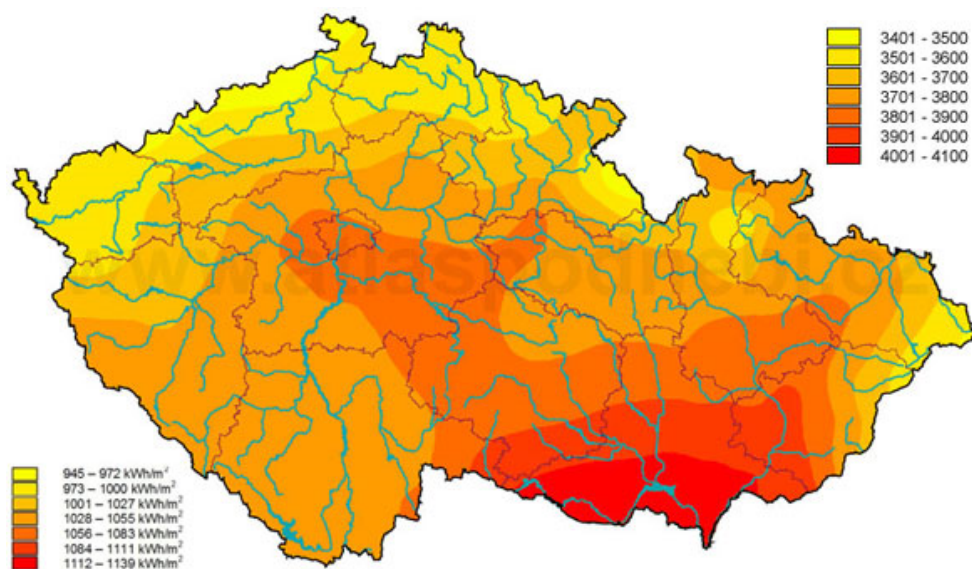
$$\tau = \tau_0 + \kappa \cdot \left(\frac{dc}{dy} \right)^n \quad (3.2)$$



Obr. 3.8 Reogram nenewtonské a newtonské kapaliny

3.4 Využití solární energie k sušení kalů na území ČR

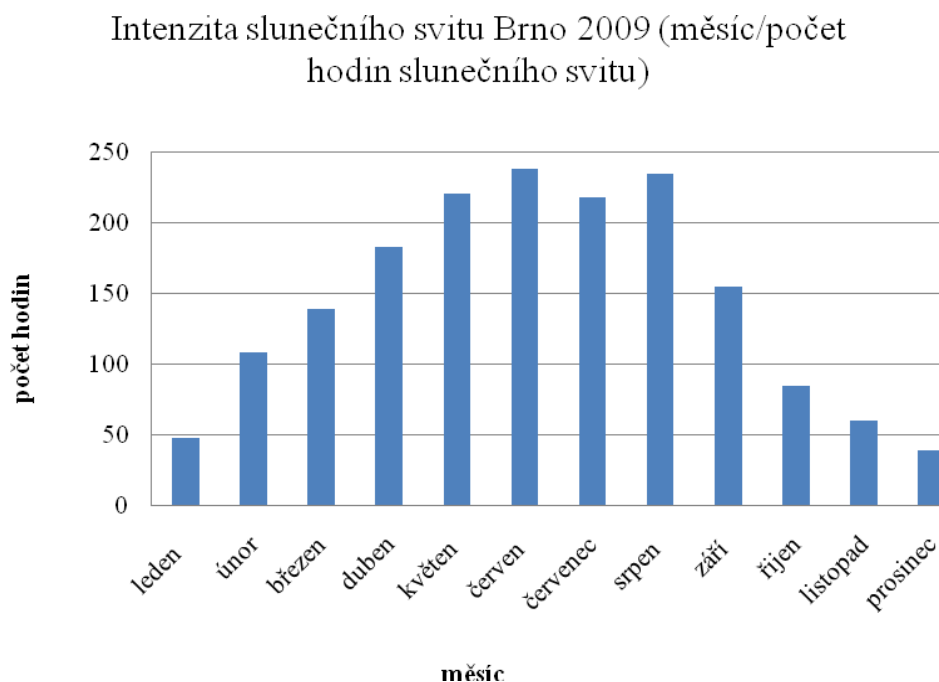
Roční příkon sluneční energie na horizontální plochu se v podmínkách ČR pohybuje od 1000 do 1250 kWh/m² za rok, z toho v období od dubna do října cca 75 % a od října do dubna cca 25 % energie. Mapka (obr. 3.9) ukazuje globální sluneční záření dopadající na vodorovnou plochu o velikosti 1 m² za rok a dává tak představu o množství využitelné sluneční energie. V oblastech se silně znečištěnou atmosférou je nutné počítat s poklesem globálního záření o 5 až 10 %, někdy dokonce 15 až 20 %. Pro oblasti s nadmořskou výškou od 700 do 2000 m n.m. lze počítat naopak s 5 % nárůstem globálního záření.



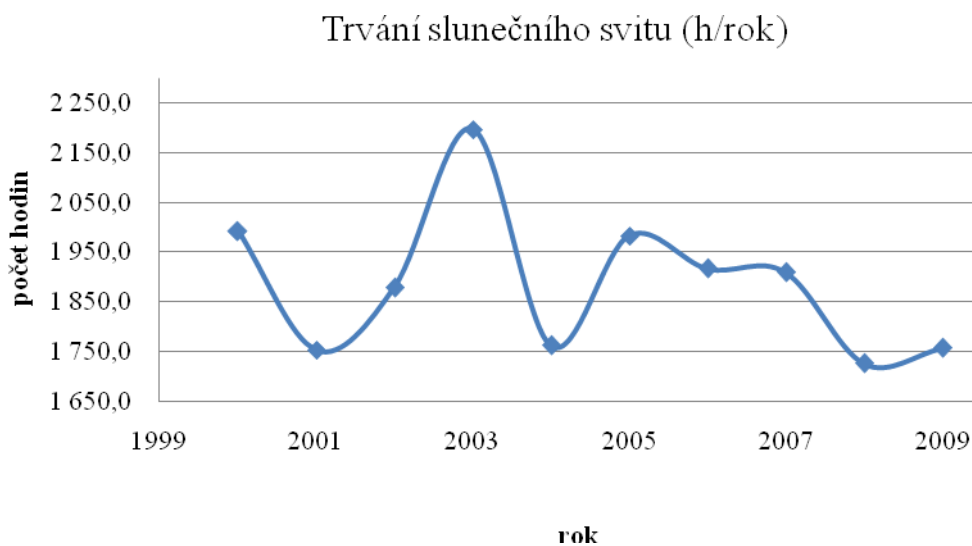
Obr. 3.9 Mapa globálního slunečního záření na území ČR (MJ/m² za rok) [14]

Důležitou veličinou pro využití slunečního záření jako hlavního zdroje tepelné energie, je intenzita slunečního záření. Intenzita slunečního záření popisuje počet hodin slunečního záření během daného měsíce. Z hlediska intenzity slunečního svitu, je na tom Brno, vzhledem k celkovému slunečnímu svitu České republiky, velice dobře (viz mapka obr. 3.9). Jak je patrné z grafu na obrázku 3.10, nejvyšší intenzita slunečního svitu je v letních měsících, kdy je den nejdelší, tudíž i délka slunečního svitu nejintenzivnější. Naopak v zimních měsících je delší tmavá část dne a tudíž i intenzita slunečního svitu méně intenzivní.

Dalším faktorem významně ovlivňujícím výběr vhodného místa k realizaci a umístění solárního zařízení, je trvání slunečního svitu během roku. Graf na obrázku 3.11 názorně ukazuje, kolik je slunečních dnů během daného roku. Brno patří v tomto ohledu k potenciálně nejlépe využitelným oblastem v České republice. Naměřené hodnoty jsou od roku 2000 do roku 2009 a hodnoty se průměrně pohybují od 1700 hodin v roce 2008 až po 2200 hodin v roce 2003, průměrná hodnota se pohybuje okolo 1900 hodin za rok.



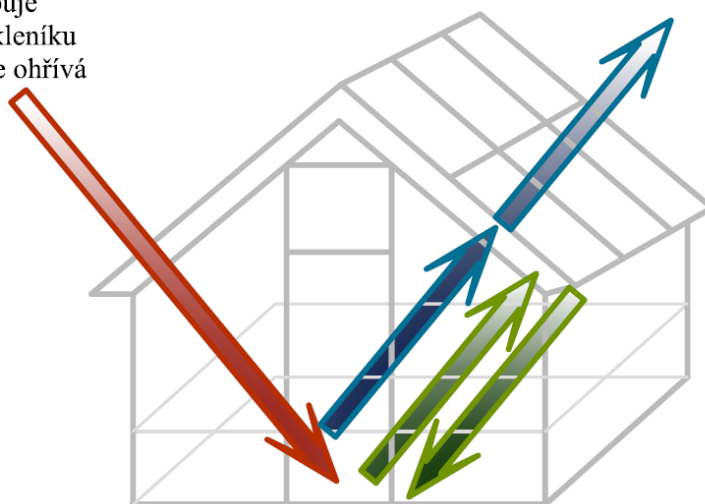
Obr. 3.10 Počet hodin slunečního svitu v roce 2009 (Brno – Tuřany) [28]



Obr. 3.11 Počet hodin slunečního svitu za rok (Brno – Tuřany) [28]

Solární sušení je kombinací konvekčního a radiačního sušení. Sluneční energie je absorbována plochami solární sušárny (kolektory, sklo, fólie), dochází k přenosu tepla do sušící komory, kde je část emitované solární energie (elektromagnetické záření) absorbována ve vlhkém materiálu (obr. 3.12). Absorbovaná energie slouží k ohřátí vlhkého materiálu a k odpaření vlhkosti. Zároveň dochází k částečné aerobní fermentaci, kde energie uvolňovaná oxidací organických látek v kalu urychluje proces odpařování. Exotermické reakce vznikající během procesu fermentace vedou k vysokému zvýšení teploty (50 až 60 °C) a podporují tedy hygienizaci kalu současně s jeho sušením [11] [12].

Tepelná energie ze slunce prostupuje přes povrch skleníku dovnitř, kde se ohřívá zem.



Část tepelné energie je odražena zpět od povrchu skleníku a část prochází ven.

Obr. 3.12 Skleníkový efekt

3.5 Využití solární energie k sušení kalů v zahraničí

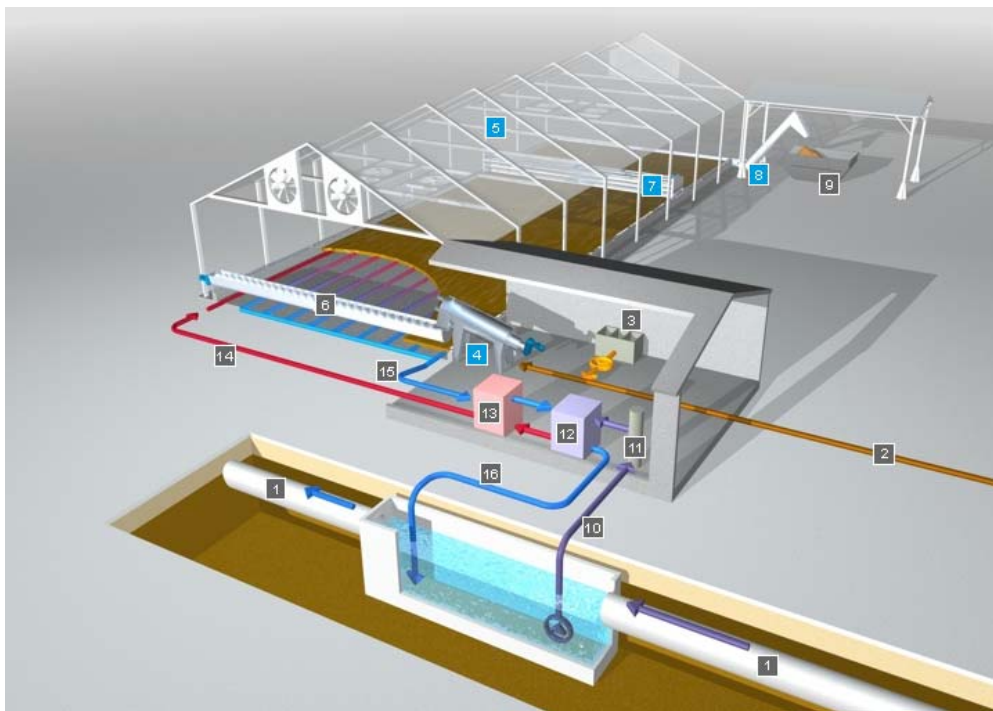
3.5.1 Huber Technology

Tekutý kal je přiveden do šnekového kalolisu, kde je odvodněn na požadovanou hodnotu (cca 25 % sušiny) (obr. 3.13). Odvodněný kal je přepraven, pomocí dopravníku (šnekový, hrabicový), do haly, kde je rovnoměrně rozvrstven. Následně je pomocí přepravního zařízení provzdušňován a přeskupován z jedné strany haly na druhou. Voda vázaná v materiálu je oparována jednak radiací, způsobenou slunečním zářením (to zejména v jarních a letních měsících, kdy je sluneční svit nejintenzivnější) a jednak podlahovým vytápěním (v případě Huber company je vytápění na bázi tepelného čerpadla, odpadní voda je ohřívána v podzemní nádrži, která je následně přepravena do systému trubek umístěných pod podlahou haly). Podlahové vytápění se používá v případě nedostatečného slunečního svitu, což bývá v zimních měsících nebo v noci. Vysušený kal je poté přepraven (šnekový dopravník) do kontejneru a je připraven k dalšímu využití. Výrobce udává minimální hodnotu sušiny obsaženou v kalu 65 %. Výše obsahu sušiny je závislá na době zdržení kalu v sušící hale.

Sušení pomocí slunečního záření a obnovitelných zdrojů energie má dle výrobce následující výhody:

- Suchý, granulovaný a pro práci bezpečný produkt s minimálním obsahem sušiny 65 %
- Mírné teploty sušení – zápach není tak intenzivní jako při sušení za vyšších teplot
- Nízký výskyt prachových částic – šetrné pro aparáty i obsluhu
- Využití obnovitelných zdrojů energie

- Nízké náklady na provoz a údržbu



Obr. 3.13 Koncepce systémů pro sušení kalů pomocí obnovitelných zdrojů energie[15]

1-Odpadní voda, 2-tekutý kal, 3-flokulační zařízení, 4-odvodnění kalu, 5-HUBER SRT solární sušárna , 6-šnekový dopravník odvodněného kalu, 7-HUBER přehrabovací zařízení, 8-ROTAMAT® šnekový dopravník vysušeného kalu, 9-vysušený kal, 10-odpadní tok, 11-filtr, 12-výměník tepla, 13-tepelné čerpadlo, 14-ohřátá voda pro vytápění podlahy, 15-chladná voda, 16-chladná voda vracující se do systému

3.5.2 Roediger BioEnergie GmbH

Roediger BioEnergie používají stejné metody sušení čistírenských kalů jako Huber Technology. Používají solární energii při dostupnosti slunečního svitu s kombinací podlahového vytápění. Rozdílná je filozofie dalšího využití vysušeného kalu. Produkt získaný pomocí EDZ sušící metody je palivo (granulát) s minimálním obsahem sušiny 90 % s výhřevností 9 – 12 MJ/kg (2,5 – 3,3 kWh/kg).

Čistírenský kal - granulované palivo může být použito jako alternativní palivo v cementárnách nebo uhelných elektrárnách. Firma uvádí, že asi 2,5 tuny vysušeného čistírenského kalu (90 % sušiny) dokáže plnohodnotně nahradit 1 tunu minerálního uhlí [16].

Čistírenský kal s obsahem sušiny pod 85 % je lepkavý až pastovitý. Takovouto látku je obtížné transportovat. Jelikož se jedná o partikulární látku s vysokým obsahem prachových částic, může docházet (při nesprávném skladování a manipulaci) k tepelným procesům uvnitř materiálu nebo až k samovznícení. Naopak získaný

vysušený granulát na hodnoty vyšší jak 90 %, je již suchý a v jádrech zrn není přítomna voda, což usnadňuje transport i skladování.

Vzhledem k omezené dostupnosti slunečního záření ve střední Evropě není možné celoročně vytápět halu pouze pomocí solární energie. To je důvod, proč technologie EDZ využívá kromě sluneční energie i levných odpadních zdrojů tepla k vytápění podlahy haly. Jako levné odpadní zdroje tepla jsou v tomto případě využity: bioplyn z čistírenských kalů, bioplyn ze zemědělství, dřevoplyn, tepelná čerpadla, odpadní teplo z průmyslových závodů atd.



Obr. 3.14 Solární sušárna čistírenských kalů - Birkhof, Sulz am Neckar, Německo [16]

3.5.3 Parkson Corporation

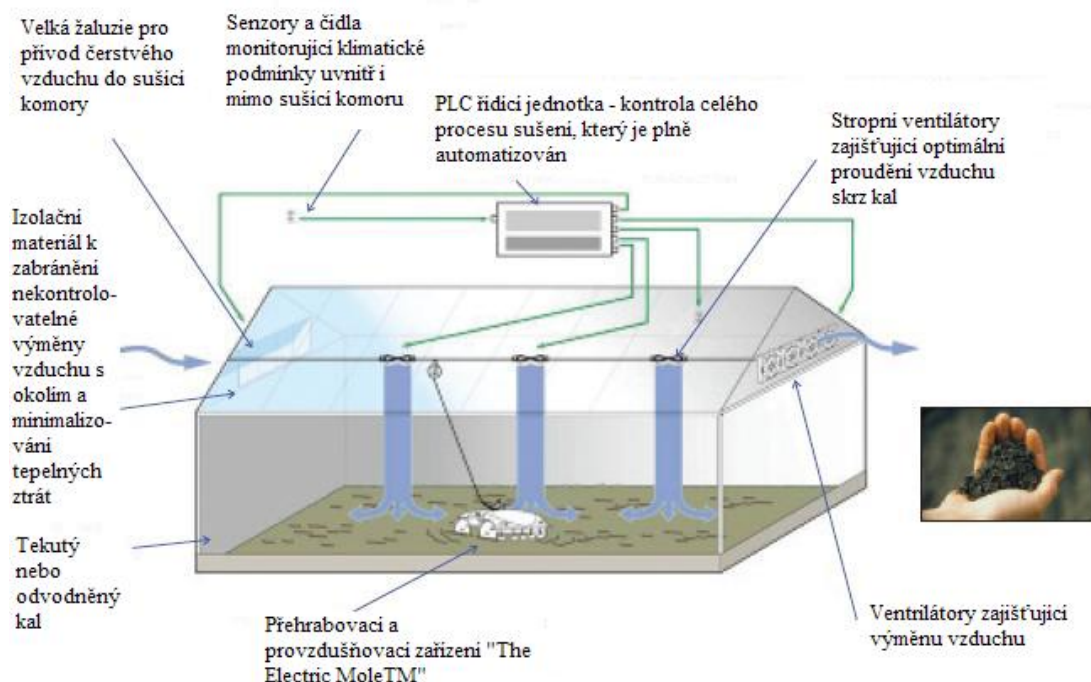
Výrobce uvádí, že nainstaloval více jak 100 zařízení THERMO-SYSTEM® na sušení čistírenských kalů na klimaticky rozdílných místech. Aparáty jsou umístěny od Švýcarských Alp, kde se teploty pohybují výrazně pod bodem mrazu až po Floridu, kde se teploty pohybují výrazně nad 30°C s vysokou mírou vzdušné vlhkosti.

Parkson THERMO-SYSTÉM® využívá slunce jako hlavní zdroj energie, kde 95% potřebné energie na sušení je zajištěno sluneční energií. Výsledkem je výrazné snížení provozních nákladů v porovnání s konvenčním způsobem sušení. Tato technologie se používá v úpravách vod a v čistírnách odpadních vod s průtočným množstvím začínajícím na 757 m³/den až po největší instalované solární sušicí systémy na světě s průtočným množstvím 15 140 m³/den.

Proces sušení je plně automatizován - téměř není nutná fyzická obsluha. Tento systém je navržen tak, aby obsahoval co nejméně pohyblivých částí s cílem maximalizovat spolehlivost a minimalizovat náklady na údržbu a prostoje.

Konečný produkt je bez zápachu, biologicky stabilní a prakticky bez patogenů.

Základní rysy	Výhody
<ul style="list-style-type: none"> • Navrženo k sušení široké škály tekutých nebo odvodněných kalů • Bezpečná, nízká teplota sušení • Jednoduchá obsluha • Jednoduché nakládání/vykládání auty, dopravníky nebo čerpadly • Efektivní využívání odpadního tepla 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimalizace nákladů na energii 30-40 kWh na tunu odpařené vody • Snížení objemu kalu až na 97% • Vysušení až na 90% sušiny • Vysoce kvalitní, homogenní konečný produkt

Obr. 3.15 THERMO-SYSTEM[®] solární sušárna čistírenského kalu [17]

3.6 Porovnání konvenčního sušení a solárního sušení

Z hlediska finančních nákladů je konvenční sušárna nesrovnatelně nákladnější než solární sušárna. Pořizovací náklady konvekčního systému sušení (řádově statisíce až miliony) se pohybují o jeden řád výše, než je tomu u solární sušárny (řádově desetitisíce až statisíce). V provozních nákladech je tento rozdíl ještě markantnější. Zanedbají-li se provozní náklady solární sušárny (energie na pohon přehrabovacího zařízení, případně ventilátorů), což je vzhledem k nesrovnatelně vyšším nákladům konvenční sušárny možné, tak je zřejmé, že je solární sušárna v tomto ohledu výrazně výhodnější.

Dojde-li ke srovnání množství usušeného materiálu za časový úsek, lze hovořit o naprostém opaku, než bylo u finančních nákladů. Nesrovnatelně mnohonásobně vyšší množství, které projde konvekční sušárnou za stejný časový úsek, než je tomu u solární sušárny. Výhodou konvekčního sušení je kontinuálnost procesu. Sušárny mohou být v provozu 24 hodin denně, za jakéhokoliv počasí. Kdežto u solárního systému je provoz přerušovaný. Provoz je silně závislý na intenzitě slunečního záření, tedy není možné

tento systém provozovat v nočních hodinách a při nedostatečném slunečním svitu. Další velkou výhodou konvenčních sušáren je menší potřebná zastavěná plocha zařízení na stejné množství materiálu, než u solárních sušáren.

	Konvenční sušení	Solární sušení
výhody	<ul style="list-style-type: none"> • kontinuální provoz • nezávislé na okolních podmínkách • menší zastavěná plocha • vyšší hmotnostní průtok sušeného materiálu • vyšší rychlost sušení 	<ul style="list-style-type: none"> • nižší pořizovací náklady • téměř nulové provozní náklady • možnost umístění na těžko dostupných místech • nižší požadavky na údržbu • delší životnost zařízení • jednoduché technické řešení
nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • vysoké pořizovací náklady • vysoké provozní náklady 	<ul style="list-style-type: none"> • nekontinuální provoz
finanční náklady	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší pořizovací a provozní náklady 	<ul style="list-style-type: none"> • nižší pořizovací náklady a téměř nulové provozní náklady

Tab. 3.16 Porovnání konvenčního a solárního sušení

4 Návrh solární sušárny

Solární sušárna je navržena dle níže uvedených zdánlivých požadavků za účelem experimentálního sušení čistírenských kalů. Sušárna bude dle předběžných předpokladů umístěna na ČOV Brno-Modřice. Do sušárny bude manuálně navážen odvodněný anaerobně stabilizovaný kal. Sušina kalu na vstupu do sušárny se bude pohybovat v rozmezí 22 až 28 % (materiál v sypném stavu). Výstupní sušina bude výrazně ovlivněna nejen aktuálními klimatickými podmínkami, ale zejména průběhem experimentu (např. množství kalu, rychlost posuvu kalu v sušárně). Posun kalu sušárnou bude zajištěn navrženým přehrabovacím systémem (viz. kapitola 4.2).

4.1 Návrh a konstrukce komory sušárny (dle Eurokódu)

4.1.1 Požadavky na konstrukci

- Rozebíratelnost konstrukce – experimentální sušárna nebude využívána celoročně, ale pouze v letních měsících. Proto byl dán požadavek na snadnou manipulaci a rozebíratelnost konstrukce, aby zaujímala minimální prostor při uskladnění.
- Možnost nastavení výšky a délky sušící komory – vzhledem k experimentálnímu charakteru sušárny byla požadována možnost změnit výšku a délku sušící komory. Šířka sušící komory bude pevná.
- Rozměry 6 x 3 m – vymezení rozměrů sušící komory z hlediska zabránění minimální zastavěné plochy na místě pro sušení určeném (přepokládá se umístění na některé ČOV v okolí Brna) a na druhé straně maximalizace sušícího prostoru
- Konstrukční prvky na umístění ventilace + potrubí – příprava záchytných systému na zavěšení ventilátorů a potrubí
- Minimalizace nákladů (pořizovacích i provozních) přehrabovacího zařízení – výběr takového přehrabovacího systému, který nebude finančně náročný na údržbu a provoz
- Krytina sušárny – důraz na ekonomickou nenáročnost, možnost snadné manipulace, zejména snadná demontovatelnost a uskladnění během zimních měsíců (upevnění krytiny na konstrukci bude řešen až na místě montáže sušárny).



Obr. 4.1 Pohled na komoru experimentální sušárny – reálná konstrukce (nahore), model (dole)

Na základě výše uvedených požadavků byla navržena a následně vyrobena segmentová konstrukce sušárny. Segmenty potřebných tvarů (viz Příloha č. 1) jsou vyrobeny z trubky čtvercového průřezu z konstrukční oceli, kvůli agresivnímu prostředí (kal, vlhkost) byla zvolena povrchová úprava pozinkováním. Segmenty jsou spojovány vždy dvěma šrouby M10 x 30. Jako krytina byla zvolena kaširovaná fólie (maximální pevnost 82 kg/m^2 , vnější vrstva obsahuje množství UV stabilizátorů).

Sušící komora je tvořena sedmi samostatnými žebry, jejichž počet může být během experimentů snížen. Každé žebro je tvořeno šestnácti segmenty. Bočnicová část je tvořena dvěma segmenty o délce 500 mm a jedním segmentem o délce 1000 mm, což umožňuje změnu výšky sušárny. Středový střešní segment je opatřen úchytným prvkem pro připevnění ventilátoru, resp. potrubí k odvodu vzduchu.

Vzhledem k experimentálnímu charakteru sušárny není sušící komora vybavena vlastní podlahou. Předpokládá se její instalace na takové ČOV, kde bude k dispozici zpevněná asfaltová nebo betonová plocha. Spodní část bočních stěn sušárny je opatřena zpevněním (plech o výšce 500 mm), které zabrání úniku kalu ze sušárny, resp. poškození spodní části folie.

4.1.2 Zatížení konstrukčního systému

a) Zatížení vlastní tíhou konstrukce

(1) Vlastní tíha stavby se má klasifikovat jako stálé pevné zatížení, viz EN 1990, 1.5.3 a 4.1.1.

(2) Pokud se vlastní tíha může měnit s časem, má se uvažovat její horní a dolní charakteristická hodnota (viz EN 1990, 4.1.2). Avšak v některých případech, kdy je zatížení vlastní tíhou volné (např. u přemístitelných přiček, viz 6.3.1.2(8)), má se posuzovat jako přídavné užité zatížení.

POZNÁMKA To platí zvláště tehdy, pokud jsou „stálá“ zatížení příznivá.

(3)P Zatížení šterkovým ložem se musí uvažovat jako zatížení stálé a při navrhování je nutné uvážit jeho možné přerozdělení, viz 5.2.2 (1) a (2).

(4)P Zatížení zeminou na střeších a terasách se musí uvažovat jako zatížení stálá.

(5) Při navrhování se má s ohledem na 2.1(3)P a 2.1(4)P přihlížet ke změnám obsahu vlhkosti a

ke změnám tloušťky, které mohou být způsobeny nekontrolovaným ukládáním během návrhové doby životnosti konstrukce.

POZNÁMKA Podrobnější informace o zemních tlacích jsou v EN 1997 [18].

Pro výpočet zatížení vlastní tíhou konstrukce je nutné znát celkovou hmotnost konstrukce s příslušenstvím (přehrabovací zařízení) a celkové rozložení sil (hmotnost krytiny pro nízkou váhu zanedbáváme). Z obrázků 4.1 a 4.2 je patrné, že je celková hmotnost konstrukce rozložena do 14 stojných noh. Celková hrubá hmotnost konstrukce je $m_c = 1100$ kg (viz. kusovník SU-2011-K), ze silového působení vyplývá, že každá stojná noha je zatížena silou F_d :

$$F_d = \frac{m_c}{14} \cdot g = \frac{1100}{14} \cdot 9,81 = 770,8 \text{ N} \quad (4.1)$$

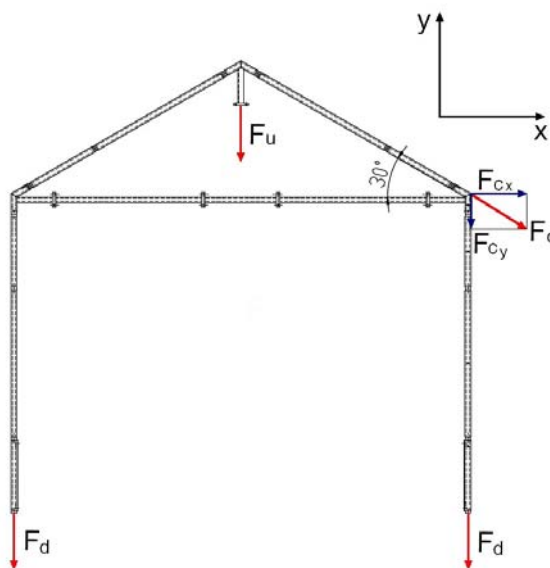
Rozložení sil působících od střechy na jednotlivé stojné nohy je zobrazeno na obrázku 4.2. Hmotnost střechy m_r lze snadno vypočítat z hmotností segmentů, z kterých je střecha složena, $m_r = (7 \cdot (3 \cdot m_{\text{KONZOLA } L=500} + 4 \cdot m_{\text{KONZOLA } L=1000} + 1 \cdot m_{\text{KONZOLA STRŠŠNÍ}} + 2 \cdot m_{\text{KONZOLA ROHOVÁ}}) + 12 \cdot m_{\text{SPOJKA PODÉLNÁ}}) = 199,28$ kg. Na každou stojnou nohu tedy působí síla F_{c_y} :

$$F_{c_y} = m_c \cdot g = \frac{199,28}{14} \cdot 9,81 = 140 \text{ N} \quad (4.2)$$

Ze silového rozložení sil zobrazené na obrázku 4.2 platí:

$$F_{c_x} = \frac{F_{c_y}}{\operatorname{tg} \alpha_s} = \frac{140}{\operatorname{tg} 30} = 242,5 \text{ N} \quad (4.3)$$

$$F_c = \frac{F_{c_y}}{\sin \alpha_s} = \frac{140}{\sin 30} = 280 \text{ N} \quad (4.4)$$



Obr. 4.2 Rozložení sil na konstrukci

b) Zatížení užitná

(1)P Užitná zatížení se musí klasifikovat jako proměnná volná zatížení, pokud není v této normě

stanoveno jinak, viz EN 1990, 1.5.3 a 4.1.1:

POZNÁMKA Užitná zatížení mostů jsou v EN 1991-2.

(2) Pokud se předpokládají v mimořádné návrhové situaci zatížení nárazem vozidel nebo mimořádná zatížení stroji, mají se tato zatížení uvážit podle EN 1991-1-7.

(3) Užitná zatížení se mají považovat za zatížení kvazistatická (viz EN 1990, 1.5.3.13). Pokud není riziko rezonance nebo jiné významné dynamické odezvy konstrukce, mohou být dynamické účinky zahrnuty v modelech zatížení, viz EN 1992 až EN 1999. Pokud lze očekávat rezonanční účinky od synchronizovaného rytmického pohybu lidí, tančení nebo skákání, pak se má pro speciální dynamický výpočet určit model zatížení. NP)
POZNÁMKA Návrhový postup může být uveden v národní příloze.

(4) U vysokozdvížných vozíků a vrtulníků se mají uvážit přídavné proměnlivé účinky zatížení ovlivněné hmotou a setrvačnými silami. Tyto účinky se uvažují prostřednictvím dynamického součinitele φ , který se použije pro statické hodnoty zatížení, jak uvádí vztah (6.3).

(5) P Zatížení, která způsobují výrazná zrychlení konstrukce nebo nosných prvků, se musí klasifikovat jako dynamická zatížení, a musí se uvážit v dynamickém výpočtu [20].

c) Zatížení větrem

(1) Zatížení větrem jsou proměnná v čase a působí přímo jako tlaky na vnější povrchy uzavřených konstrukcí a vlivem prodyšnosti vnějšího povrchu působí také nepřímo na vnitřní povrchy. Mohou také přímo působit na vnitřní povrch otevřených konstrukcí. Tlaky působící na plochy povrchu způsobují síly kolmé k povrchu konstrukce nebo k jednotlivým prvkům pláště. Pokud jsou velké plochy konstrukce obtékány větrem, mohou významné třecí síly působit tečně k povrchu.

(2) Zatížení větrem se popisuje zjednodušeným souborem tlaků nebo sil, jejichž účinky jsou ekvivalentní maximálním účinkům turbulentního větru.

(3) Pokud není uvedeno jinak, mají se zatížení větrem klasifikovat podle EN 1990, 4.1.1 jako proměnná pevná zatížení.

(4) Zatížení větrem vypočtená podle EN 1991-1-4 jsou charakteristické hodnoty (viz EN 1990, 4.1.2). Jsou stanovena ze základních hodnot rychlosti větru nebo dynamického tlaku. Základní hodnoty jsou podle EN 1990, 4.1.2(7)P charakteristické hodnoty s roční pravděpodobností překročení 0,02, která odpovídá střední době návratu 50 let.

(5) Účinek větru na konstrukci (tj. odezva konstrukce) závisí na velikosti tvaru a dynamických vlastnostech konstrukce. Norma zahrnuje dynamickou odezvu způsobenou turbulencí ve směru větru při rezonanci s kmitáním ve směru větru v základním tvaru ohybového kmitání se stejným znaménkem.

Odezva konstrukce se má vypočítat podle kapitoly 5 z maximálního dynamického tlaku q_p v referenční výšce v nerušeném větrném poli, ze součinitelů sil a tlaků a ze součinitele konstrukce c_{sd} (podle kapitoly 6). Tlak q_p závisí na větrných podmínkách, drsnosti terénu, orografii a referenční výšce. Je roven dynamickému tlaku od střední rychlosti větru zvýšenému o příspěvky od krátkodobých fluktuací tlaku.

Aeroelastická odezva poddajných konstrukcí, jako jsou lana, stožáry, komíny a mosty se má uvážit.

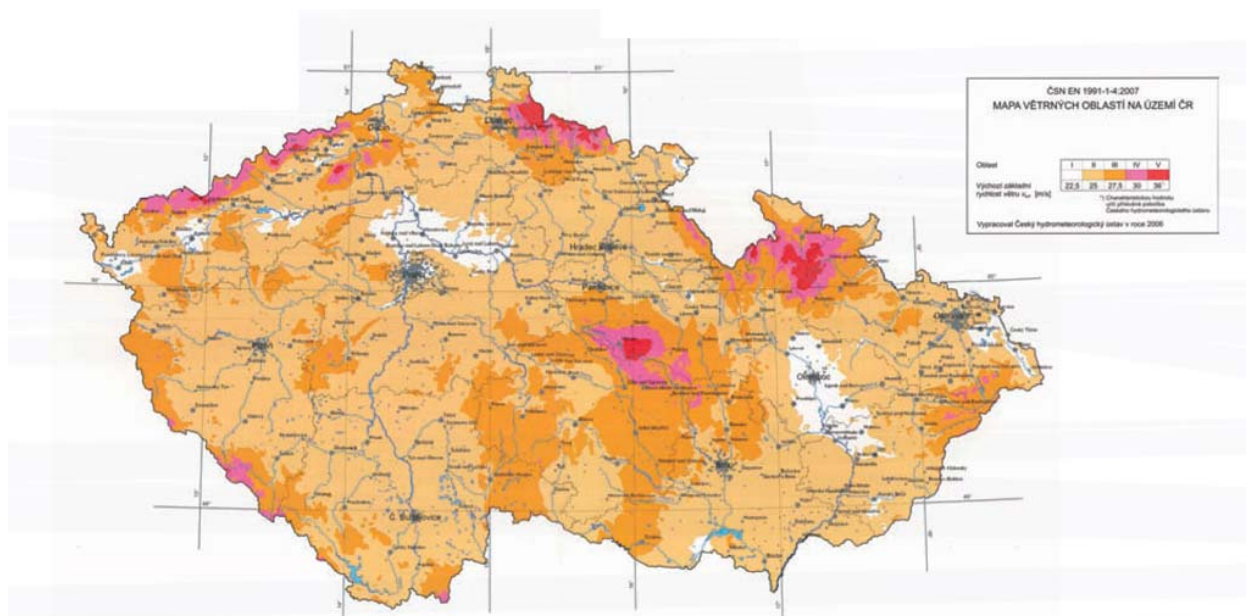
POZNÁMKA Zjednodušený návod pro stanovení aeroelastické odezvy je uveden v příloze E [19].

Rychlost a tlak větru

Povětrnostní podmínky různých oblastí se popisují hodnotami charakteristické desetiminutové střední rychlosti větru $v_{b,0}$ ve výšce 10 m nad zemí v terénu s nízkou vegetací (terén kategorie II) určená z Obr. 4.3 Mapa větrných oblastí na území ČR. Tyto charakteristické hodnoty odpovídají roční pravděpodobnosti překročení 0,02.

oblast	I	II	III	IV	V
$v_{b,0}$ [m/s]	22,5	25	27,5	30	36

Tab. 4.1 Kategorie terénu [14]



Obr. 4.3 Mapa větrných oblastí na území ČR [14]

Základní rychlost větru v_b

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 25 = 25 \text{ m/s} \quad (4.5)$$

kde c_{dir} je součinitel směru větru (obecně $c_{dir} = 1$)
 c_{season} je součinitel ročního období (obecně $c_{season} = 1$)
 $v_{b,0}$ je výchozí základní rychlost větru

Charakteristická střední rychlost větru $v_m(z)$ ve výšce nad terénem

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,78 \cdot 1 \cdot 25 = 19,5 \text{ m/s} \quad (4.6)$$

kde $c_0(z)$ je součinitel orografie – horopisu (vliv osamělých kopců, hřebenů, útesů a příkrých stěn), pro většinu návrhových situací $c_0(z) = 1$ (rychlost větru není zvětšena o více jak 5 % vlivem orografie)

$c_r(z)$ je součinitel nerovnosti terénu a je dán vztahem

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{3}{0,05}\right) = 0,78 \text{ pro } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.7)$$

kde z_0 je délka nerovnosti (viz tab. 4.2 kategorie terénu)

z_{\min} je minimální výška (viz tab. 4.2 kategorie terénu)

z_{\max} je 200m

k_r je součinitel terénu

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19 \quad (4.8)$$

kde $z_{0,II} = 0,05$ m (viz tab. 4.2 kategorie terénu)

Kategorie terénu	z_0 [m]	z_{\min} [m]
0 - moře a přímořské oblasti	0,003	1
I - jezera nebo vodorovná plochá krajina bez překážek	0,01	1
II - krajina s nízkou vegetací, jako je tráva nebo izolované překážky	0,05	2
III - oblast pravidelně pokrytá vegetací, budovami nebo přakážkami	0,3	5
IV - alespoň 15 % povrchu je pokryto budovami, průměrná výška přesahuje 15 m	1	10

Tab. 4.2 Kategorie terénu a parametry terénu [19]

Maximální dynamický tlak $q_p(z)$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b = [1 + 7 \cdot 0,244] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 19,5^2 = 643,6 \text{ N/m}^2 \quad (4.9)$$

kde $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2$ představuje základní tlak větru

ρ je měrná hmotnost vzduchu, která závisí na nadmořské výšce, teplotě a tlaku vzduchu

$$c_e(z) \text{ je součinitel expozice, } c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.10)$$

$$q_b \text{ je základní dynamický tlak větru, } q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(z) \quad (4.11)$$

$$[1 + 7 \cdot I_v(z)] \text{ je vliv turbulencí, kde } I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4. 12)$$

pro $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$

k_l je součinitel turbulence (většinou $k_l = 1$)

Tlak větru na povrchy

Tlak větru w_e , působící na vnější povrchy konstrukce:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4. 13)$$

kde $q_p(z_e)$ je maximální dynamický tlak
 z_e je referenční výška pro vnější tlak
 c_{pe} je součinitel vnějšího tlaku

Tlak větru w_i , působící na vnitřní povrchy konstrukce

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (4. 14)$$

kde $q_p(z_i)$ je maximální dynamický tlak
 z_i je referenční výška pro vnitřní tlak
 c_{pi} je součinitel vnitřního tlaku

Síly od větru

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1 \cdot 0,96 \cdot 643,6 \cdot 18 = 11121 \text{ N} \quad (4. 15)$$

kde $c_s c_d$ je součinitel konstrukce (pro pozemní stavby s výškou menší než 15 m lze $c_s c_d$ vzít rovno 1,0
 c_f je součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky
 $q_p(z_e)$ je maximální dynamický tlak v referenční výšce z_e
 A_{ref} je referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku

$$A_{ref} = l \cdot b = 3 \cdot 0,04 = 0,12 \text{ m}^2 \quad (4. 16)$$

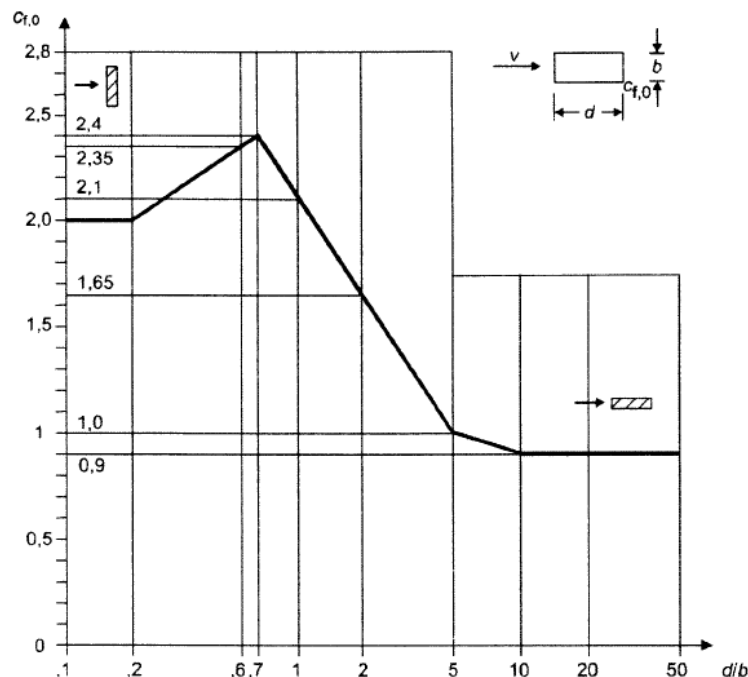
kde l je délka uvažovaného nosného prvku
 b je šířka uvažovaného prvku

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 2,1 \cdot 0,7 \cdot 0,65 = 0,96 \quad (4. 17)$$

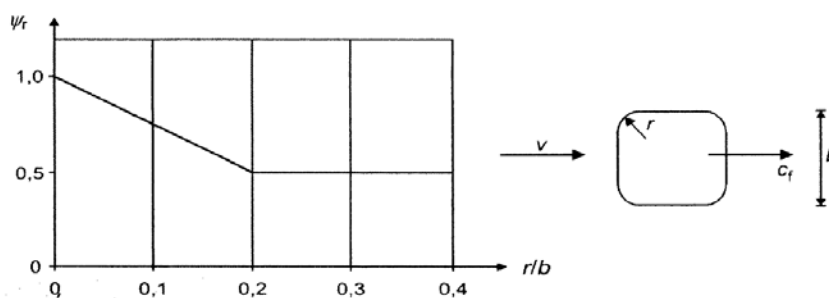
kde $c_{f,0}$ je součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy a bez uvažování vlivu koncových vírů (z grafu Obr 4.4 $d/b = 40/40 = 1 \rightarrow c_{f,0} = 2,1$)

ψ_r je redukční součinitel pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy (z grafu Obr. 4.5 $r/b = 60/400 = 0,15 \rightarrow \psi_r = 0,7$)

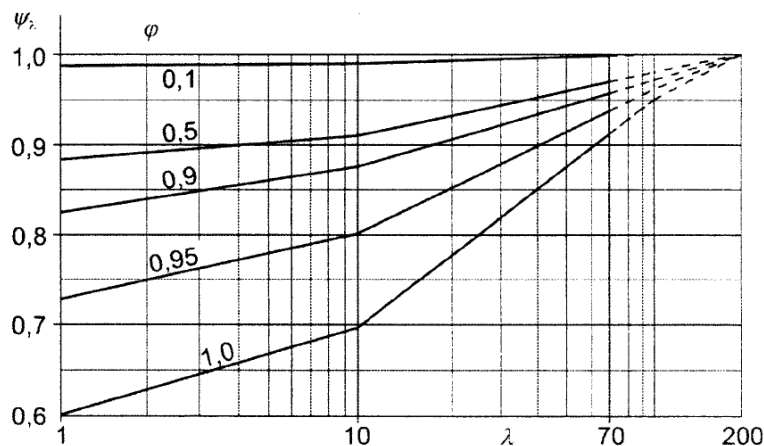
ψ_λ je součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci (pro $l < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = l/b$ nebo $\lambda = 70$, $\lambda = l/b = 6/2 = 3$, součinitel plnosti $\phi = 1$, z grafu Obr. 4.6 $\psi_\lambda = 0,65$)



Obr 4.4 Součinitel síly $c_{f,0}$ pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy bez vlivu proudění kolem volných konců [19]



Obr. 4.5 Redukční součinitel ψ_r pro čtvercový průřez se zaoblenými rohy [19]



Obr. 4.6 Směrné hodnoty součinitele koncového efektu ψ_λ jako funkce součinitele plnosti ϕ v závislosti na štíhlosti λ [19]

d) Zatížení sněhem

(1)P Zatížení sněhem se musí uvažovat jako proměnné pevné zatížení (viz také 5.2), pokud není v této normě stanoveno jinak, viz EN 1990:2002, 4.1.1(1)P a 4.1.1(4).

(2) Zatížení sněhem zahrnutá v této normě se mají uvažovat jako statická zatížení, viz EN 1990:2002, 4.1.1(4).

(3) Podle EN 1990:2002, 4.1.1(2), lze pro zvláštní podmínky definované v 1.6.3, a v závislosti na) zeměpisné poloze, uvažovat výjimečná zatížení sněhem jako mimořádná zatížení.NP4

POZNÁMKA V národní příloze lze uvést podmínky pro použití tohoto článku (které mohou zahrnovat zeměpisné polohy).

(4) Podle EN 1990:2002, 4.1.1(2), lze pro zvláštní podmínky definované v 1.6.10, a v závislosti na zeměpisné poloze, uvažovat zatížení způsobená výjimečným navátím sněhu jako mimořádná) zatížení.NP5

POZNÁMKA V národní příloze lze uvést podmínky pro použití tohoto článku (které mohou zahrnovat zeměpisné polohy) [21].

Zatížení sněhem na střechách pro trvalé/dočasné návrhové situace

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,7 = 0,448 \text{ kPa} \quad (4.18)$$

kde μ_i je tvarový součinitel zatížení sněhem

s_k je charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi (z Obr. 4.6 Mapa sněhových oblastí na území ČR pro náš případ platí $s_k = 0,7 \text{ kPa}$)

C_e je součinitel okolního prostředí

C_t je tepelný součinitel

Tvarový součinitel zatížení sněhem sedlové střechy:

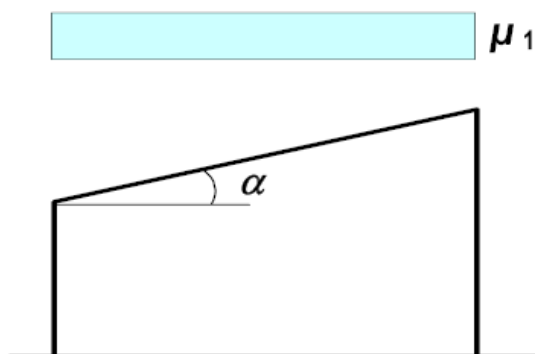
Tvarový součinitel zatížení sněhem μ_1 , který se má použít pro pultové střechy, je uveden v tabulce Tab. 4.3 a na obrázku Obr. 4.7.

Z výkresové dokumentace je patrné, že úhel skonu střechy je $\alpha = 30^\circ$. Můžeme tedy určit tvarový součinitel $\mu_1 = 0,8$.

úhel sklonu střechy α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_1	$0,8 + 0,8\alpha/30$	1,6	-

Tab. 4.3 Tvarové součinitele zatížení sněhem [21]

Topografie	C_e
Otevřená ^{a)}	0,8
Normální ^{b)}	1
Chráněná ^{c)}	1,2



Obr. 4.7 Tvarový součinitel zatížení sněhem – pultová střecha [21]

Součinitel okolního prostředí

Pro stanovení zatížení sněhem na střeše se má použít součinitel okolního prostředí C_e . Při volbě součinitele C_e se má uvážit budoucí výstavba v okolí staveniště. C_e se má volit rovno jedné, pokud pro různé topografie není stanoveno jinak. ^{NP13)}

POZNÁMKA Hodnoty součinitelů C_e mohou být pro různé topografické poměry uvedeny v národní příloze. [21]

^{a)} *Otevřená topografie*: rovná plocha bez překážek, otevřená do všech stran, nechráněná nebo jen málo chráněná terénem, vyššími stavbami nebo stromy.

^{b)} *Normální topografie*: plochy, kde nedochází na stavbách k výraznému přemístění sněhu větrem kvůli okolnímu terénu, jiným stavbám nebo stromům.

^{c)} *Chráněná topografie*: plochy, kde je uvažovaná stavba výrazně nižší než okolní terén nebo je stavba obklopena vysokými stromy a/nebo vyššími stavbami.

Tab. 4.4 Doporučené hodnoty součinitele C_e pro různé topografie [21]

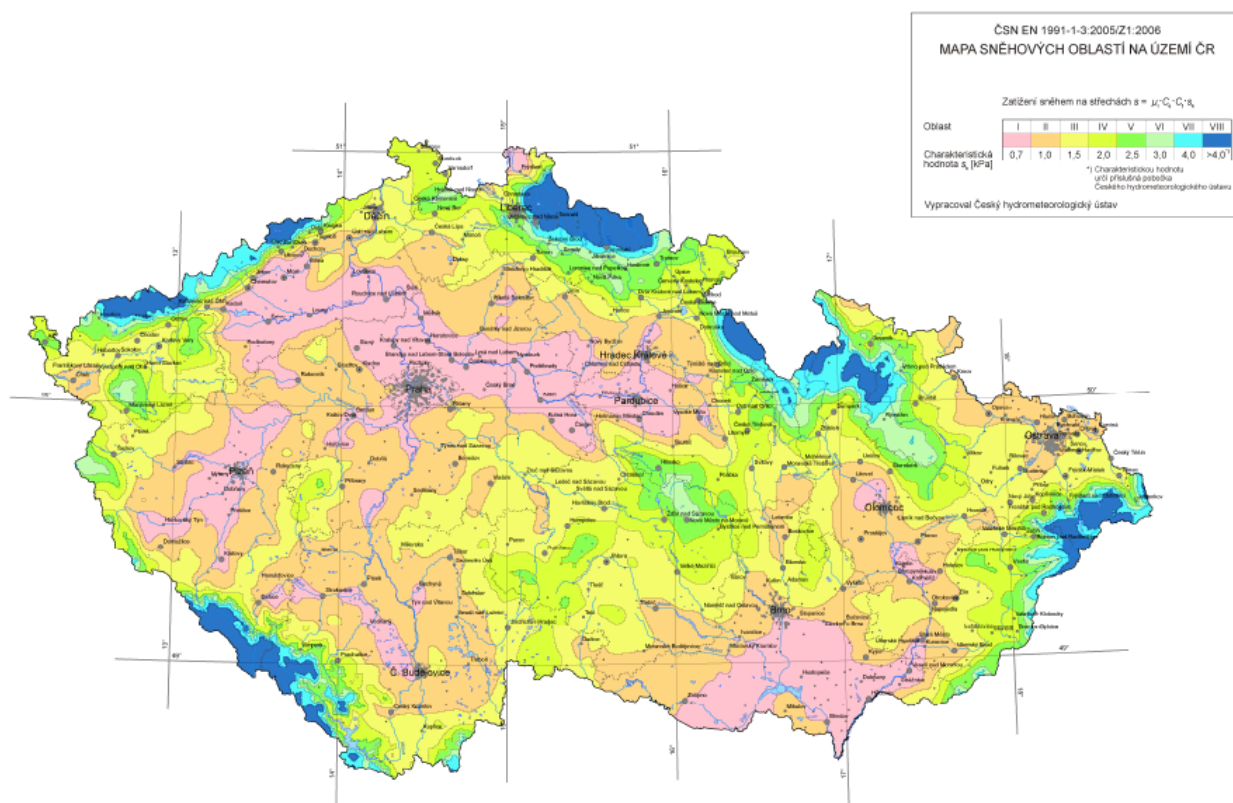
Tepelný součinitel C_t se má použít tam, kde je možné vzít v úvahu snížení zatížení sněhem na střeše, která má vysokou tepelnou prostupnost ($> 1 \text{ W/m}^2\text{K}$), zejména u některých skleněných střech, kde dochází k tání sněhu vlivem prostupu tepla střechou. ^{NP14)}

Pro všechny ostatní případy je:

$$C_t = 1,0$$

POZNÁMKA 1 Národní příloha může na základě tepelně izolačních vlastností materiálů a tvaru stavby dovolit použití nižších hodnot součinitele C_t .

POZNÁMKA 2 Další informace lze získat v ISO 4355 [21].



Obr. 4.6 Mapa sněhových oblastí na území ČR [14]

Diskuze výsledků výpočtů zatížení konstrukce:

Z předcházejících výpočtů vyplývá následující: celá konstrukce bude zatížena 11 121 N při rychlosti větru 19,5 m/s, což odpovídá střední charakteristické rychlosti větru. Jeden metr čtvereční stěny sušárny je tedy zatížen 617 N. Z důvodu zabezpečení funkčnosti zařízení a bezpečnosti obsluhy sušárny bude konstrukce fixována k podložce. Kotvení bude provedeno dvěma šrouby na každou stojnou nohu. Celý systém tedy bude připevněn 28 šrouby k podložce (podlaze). Při vyšší rychlosti větru než je 25 m/s dojde k perforaci fólie a nedojde k porušení konstrukce sušárny.

4.2 Návrh konstrukce přehrabovacího zařízení

4.2.1 Výběr nejvhodnější varianty přehrabovacího zařízení

a) Přehrabovací systém WendeWolf®

Hlavní komponentou sušárny je rotující a zároveň pohybující se po celé délce sušící komory zařízení s názvem WendeWolf® (Obr. 4.7 a 4.8). Centrální část tvoří buben na němž jsou připevněny hřebeny a pádla, která rovnoměrně kypří a provzdušňují kal. Výšku bubnu je možno měnit v závislosti na výšce sušeného kalu. Otáčky bubnu jsou také měnitelné s maximální frekvencí otáčení 60 ot/min. Jednotka se může pohybovat v obou směrech [23].

Toto zařízení není příliš vhodné pro použití u experimentální sušárny. Hlavní nevýhodou je velikost bubnu osazeného hřebeny, který není možné demontovat na menší části a zajistit tak maximální skladnost v době, kdy není sušárna instalována.



Obr. 4.7 WendeWolf® přehrabovací zařízení [23]



Obr. 4.8 Přehrabovací systém WendeWolf® [23]

b) Přehrabovací systém Roediger BioEnergie GmbH

Přehrabovací systém tvoří segmenty dlouhé přes celou šířku sušící komory. Tyto segmenty jsou navzájem propojeny řetězy. Jak je vidět na obrázku (Obr. 4.9) každý segment je tvořen dlouhou trubicou čtvercového průřezu, na níž jsou připevněny hrabice tvořené hroty, které mají za úkol nanést kal provzdušnit, promísit a posunovat po délce sušárny.

Obdobný přehrabovací systém by bylo výhodné využít i v experimentální sušárně s tím, že musí být kladen důraz na konstrukční jednoduchost, snadnou demontovatelnost a uskladnitelnost.



Obr. 4.9 Přehrabovací systém Roediger [16]

c) Řetězový shrabovák Kunst s.r.o.

Řetězový shrabovák firmy Kunst s.r.o. (viz obr. 4.10) je primárně určen na vystrojení podélných usazovacích nádrží. Shrabovák je tvořen dvěma plastovými řetězy se stíracími lopatkami, které jsou vedeny podél stěn nádrže trojicí řetězových kol. Řetězová kola i stírací lopatky jsou vyráběny z plastu. Pohon shrabováku je zajišťován motorem s převodovkou [22].



Obr. 4.10 Řetězový plastový shrabovák Kunst [22]

d) Přehrabovací systém pro experimentální sušárnu

Jako nejvýhodnější a nejlepší řešení se jevil systém přehrabování, který používá společnost Kunst s.r.o. Přehrabování probíhající kontinuálně bez požadavku přítomnosti obsluhy. Zařízení je jednoduché na údržbu a vzhledem k malému počtu mechanismů i odolné vůči závažnějším poruchám. Zařízení bylo vybráno i vzhledem k dobrým referencím a zkušenostem v provozu. Z ekonomického a konstrukčního hlediska je řetězový shrabovák rovněž nejvýhodnější.

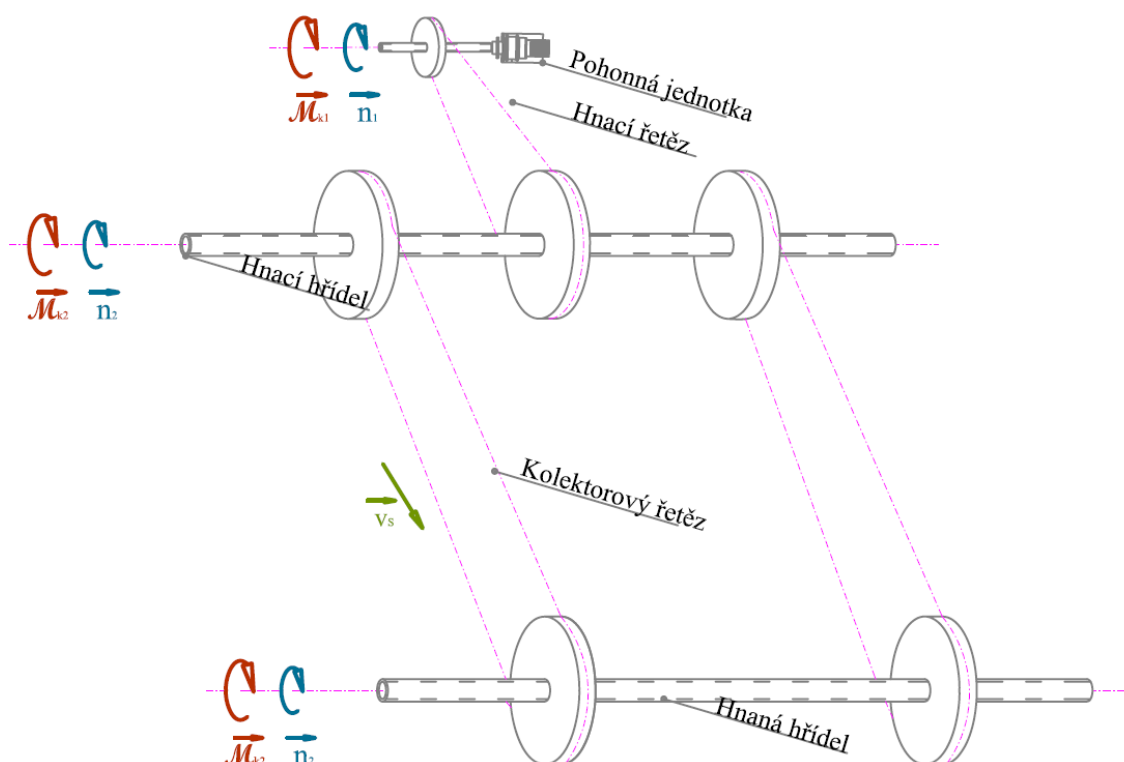
Jak je z výše uvedeného patrné, lze s výhodou využít některé sériově vyráběné komponenty tohoto shrabováku pro vystrojení sušárny. Těmi komponenty jsou plastové řetězy a plastová ozubená kola. Jejich výhodou oproti nerezovému systému firmy Roediger BioEnergie GmbH je hlavně malá hmotnost. Pevnost v tahu je sice oproti řetězům z oceli nižší, ale pro využití v experimentální sušárně je více než dostačující.

Pro úplnost přehrabovacího systému musí být dále navržen vhodný motor s převodovkou, přenos pohybu z převodovky na hnané řetězové kolo, systém upevnění řetězových kol ke stěnám sušárny a hřídele spojující řetězová kola.

4.2.2 Výběr jednotlivých konstrukčních prvků přehrabovacího systému

a) Motor pohánějící přehrabovací zařízení

Na obrázku 4.11 je názorně zobrazeno, jakým způsobem přehrabovací systém funguje. Systém je sestaven z hnací hřídele s napevno fixovanými dvěma ozubenými hnanými koly a jedním hnacím kolem, které je řetězem spojeno s pohonnou jednotkou. Hnaná hřídel je spojena s hnací hřídelí kolektorovým řetězem přes ozubená kola. Ozubená kola jsou, stejně jako u hnací hřídele, fixována napevno.



Obr. 4.11 Přehrabovací soustava ozubených kol a hřídelí s pohonnou jednotkou

Aby bylo možné určit optimální pohon přehrabovacího zařízení, je nutné provést několik kroků:

- Určit optimální rychlost přehrabování
- Určit tahové síly v působící na hnaný řetěz
- Určit otáčky hnané i hnací hřídele a stanovit otáčky a výkon motoru

Rychlost pohybu přehrabovacího zařízení byla stanovena na základě experimentálních údajů a zkušeností z provozu na již existujících zařízeních, která pracují na podobném principu, $v_s = 0,2 \text{ m/s} \Rightarrow$ z čehož lze vypočítat otáčky řetězového kola.

Pro výpočet otáček řetězového hnaného kola platí vzorec, kde $v_s \text{ [m/s]}$ je rychlost pohybu kolektorového řetězu a $D_{sp} \text{ [m]}$ je průměr řetězového hnaného kola:

$$n_{sp} = \frac{v_s}{\pi \cdot D_{sp}} = \frac{0,2}{\pi \cdot 0,5648} = 0,036 \text{ s}^{-1} \quad (4. 19)$$

Pro výpočet otáček řetězového hnacího kola platí vzorec, kde D_{sb} [m] je průměr hnacího řetězového kola:

$$n_{sb} = \frac{v_s}{\pi \cdot D_{sb}} = \frac{0,2}{\pi \cdot 0,5648} = 0,036 \text{ s}^{-1} \quad (4. 20)$$

Pro výpočet otáček řetězového hnacího kola na motoru platí vzorec, kde D_{sm} [m] je průměr ozubeného kola na hřídeli motoru:

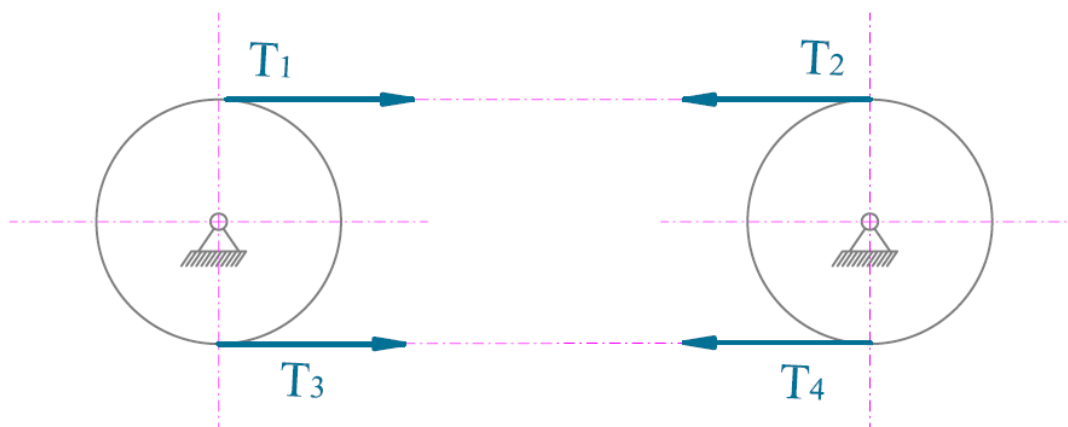
$$n_{sm} = \frac{v_s}{\pi \cdot D_{sm}} = \frac{0,2}{\pi \cdot 0,2} = 0,32 \text{ s}^{-1} \quad (4. 21)$$

Pro výpočet otáček na výstupu z převodovky, kde D_m [m] je průměr hřídele motoru s převodovkou:

$$n_m = \frac{v_s}{\pi \cdot D_m} = \frac{0,2}{\pi \cdot 0,025} = 2,55 \text{ s}^{-1} = \frac{2,55}{\frac{1}{60}} = 152,8 \text{ min}^{-1} \quad (4. 22)$$

Z výše provedeného výpočtu, vyplývá, že při dodržení rychlosti řetězu 0,2 m/s je zapotřebí instalovat motor s výstupními otáčkami alespoň 153 min⁻¹.

Dalším kritériem určujícím typ a výkon motoru, je stanovení odporů proti pohybu řetězu (obr. 4.12) [31].



Obr. 4.12 Tahové síly působící na řetěz řetězu

Výpočet maximálního tahu v hnaném řetězu, kde m_c [kg] je celková váha na okruhu, f_c [-] je orientační součinitel valivých odporů včetně vlivů odporů v obloucích dráhy, L_{celk} [m] je celková délka jednoho řetězu a μ_c [-] je orientační hodnota základních odporů přehrabováku, nezávislá na váze materiálu:

$$T_{\max} = \frac{m_c}{2} \cdot f_c + L_{\text{celk}} \cdot \mu_c = \frac{306,98}{2} \cdot 0,02 + 13 \cdot 0,75 = 12,8 \text{ kg} = 12,6 \cdot 9,81 = 125,8 \text{ N}$$

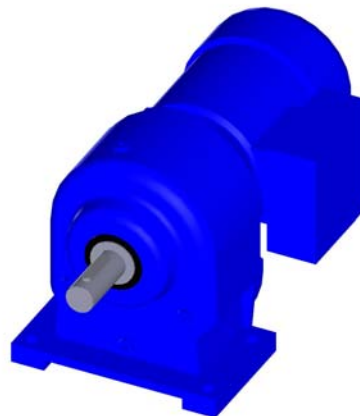
Výpočet odporu hnací řetězové kladky hnacího řetězu, kde $f_1=0,03$ [-] je součinitel čepového tření v ložiskách hnacího řetězového kola, $d_{\text{čk}}$ [m] je průměr čepu řetězového kola, D_{roz} [m] je průměr roztečné kružnice, $d_{\text{čř}}$ [m] je průměr čepu řetězu, $T_1=T_{\max}$ [N] je tahová síla hnacího řetězu na nabíhající straně hnací řetězové kladky a $T_2=0$ [N] je tahová síla hnacího řetězu na odbíhající straně hnací řetězové kladky:

$$F_{T_2} = (f_1 \cdot \frac{d_{\text{čk}}}{D_{\text{roz}}} + f_3 \cdot \frac{d_{\text{čř}}}{D_{\text{roz}}}) \cdot (T_1 + T_2) = (0,03 \cdot \frac{0,06}{0,31} + 0,2 \cdot \frac{0,029}{0,31}) \cdot (123,2 + 0) = 3 \text{ N}$$

Výpočet výkonu pohonné jednotky:

$$P_m = \frac{2 \cdot T_{\max} \cdot v_s}{\eta} = \frac{2 \cdot 125,8 \cdot 0,2}{0,75} = 67,1 \text{ W}$$

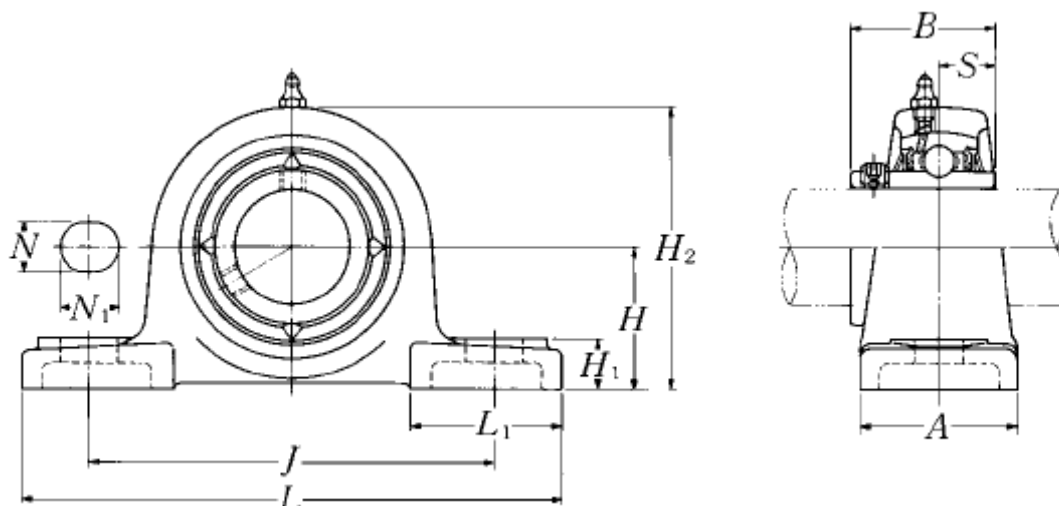
Na základě vypočtených hodnot byl vybrán elektromotor s čelní převodovkou NORD SK 02 – 63L/4 s výstupní hodnotou otáček 162 min^{-1} , se jmenovitým výkonem 0,18 kW, s výstupním momentem 11 Nm, s celkovým převodovým poměrem 8,19, s hmotností 12 kg a s průměrem hřídele motoru s převodovkou 25 mm (obr. 4.13 a výkres 1-SU-2011-00).



Obr. 4.13 Elektromotor Nord s čelní převodovkou [34].

b) Upevňovací prvky hřídelí na konstrukci

Jelikož jsou hřídele spojeny s ozubenými koly napevno, je potřeba vyřešit upevňovací systém hřídelí ke konstrukci sušící komory. Z několika možností byl vybrán systém kluzného ložiska s uložením (viz. ULOŽENÍ LOŽISKA 3 – SU-2011-12). Náskres ložiska s rozměry je zobrazen na obrázku 4.14. Z důvodu nerovnoměrného povrchu a většího průměru hřídele než je ložisko s uložením, je nutné provést povrchovou úpravu hřídelí (viz. výkresová dokumentace HŘÍDEL 4-SU-2011-26).



Obr. 4.14 Valivé ložisko s uložením – nákres.

c) Hřídele

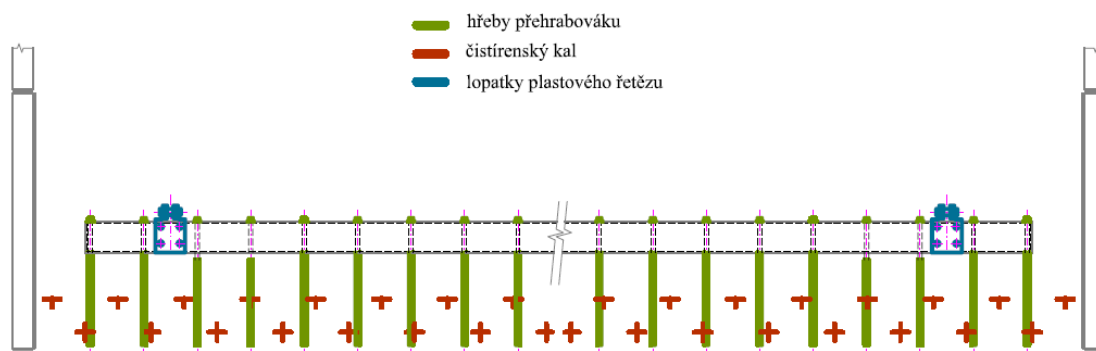
V systému jsou použity dvě totožné hřídele s délkou 3100 mm, s rozdílem v uložení kol u hnací a hnané hřídele.

Hnaná hřídel (viz. výkresová dokumentace HNANÁ HŘÍDEL S PŘÍRUBOU 4-SU-2011-05 se skládá ze dvou ozubených kol – řetězových kol, s vnějším průměrem 564,8 mm a počtem zubů 24, uložených osově souměrně v délce 1048 mm od středu hřídele. Řetězová kola jsou k hřídeli fixována napevno, pomocí přírub (výkres č. 4-SU-2011-27 Příruba). Řetězová kola jsou vyrobena z materiálu UHMWPE (Ultra-high-molecular-weight polyetylen). Hřídel je vyrobena z konstrukční ocele 11.523 TR 89x10-3100 dle ČSN 42 5715.

Hnací hřídel (viz. výkresová dokumentace HNACÍ HŘÍDEL S PŘÍRUBOU 4-SU-2011-37) dokumentace je konstrukčně totožná s hřídelí hnanou, s rozdílem v umístění ozubeného hnacího kola. Hnací ozubené kolo, s průměrem 564,8 mm, je vyrobeno z totožného materiálu, jako jsou řetězová kola, tedy z materiálu UHMWPE. Hnací ozubené kolo je umístěno ve středu hnací hřídele a fixováno přírubou, stejně jako kola hnaná.

d) Přehrabovací systém s hrabici ve tvaru hřebů

Hrabicový přehrabovák (viz. výkresová dokumentace HRABLO 4-SU-2011-06) (Obr. 4.15) je upevněn pomocí článků s patkou na umělohmotný řetěz. Konstrukce je jednoduchá. Tvoří ji prvek z konstrukční ocele – trubka čtvercového průřezu, na kterou jsou připevněny hrabice ve tvaru hřebů či lopatek. Pro sušicí komoru uvedených rozměrů bude dostačující jeden až dva hrabivé přehrabovačky. Výhodou konstrukčního řešení je jednoduchá výměna různých tvarů hrabic, což může být využito v rámci dalšího výzkumu popřípadě optimalizace.



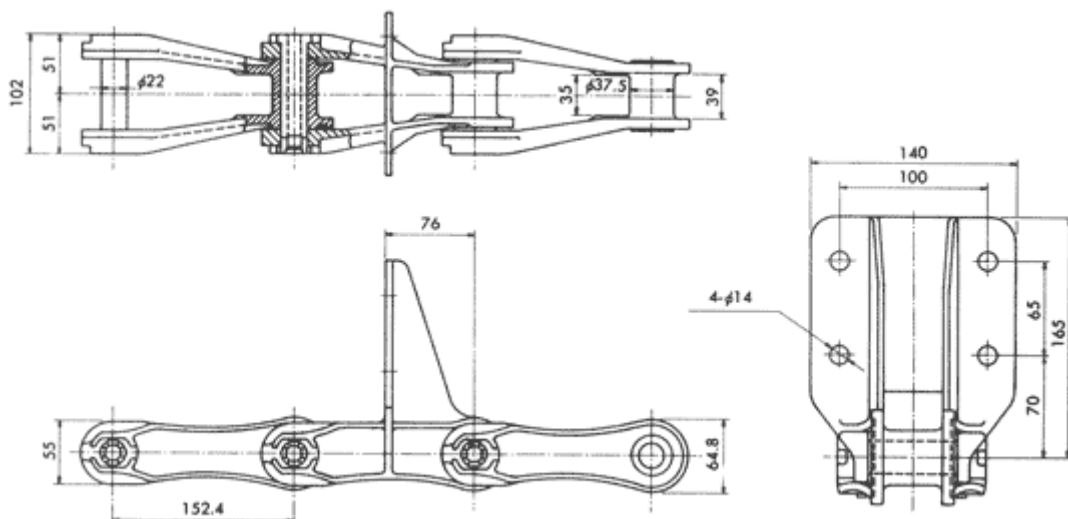
Obr. 4.15 Hrabicový systém přehrabováku

e) Řetězy

Pro posun přehrabovacího zařízení jsou používány plastové řetězy. Speciálně vyvinutý plastový řetěz pro použití na čistírnách a úpravnách vod, nízké váhy a vysoké odolnosti vůči korozi (obr. 4.16) je výhodnějším řešením než řetězy z nerezové ocele. Díky své nízké váze je manipulace s řetězy relativně jednoduchá.

Nevýhodou těchto řetězů může být jejich tepelná nestálost. Při kolísání teplot může být problém s udržením konstantního napnutí řetězů, avšak tato vlastnost není nikterak tragická (tepelná stálost je zaručena od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$). V případě prodloužení řetězu, na základě zmíněných podmínek, lze snadno z řetězu demontovat jeden článek a tím docílit opětovného natažení. Pevnost v tahu je oproti řetězům z litiny nebo nerezové oceli mnohokrát nižší. Řetězy používané v oboru čištění odpadních vod pracují při nízkých otáčkách a nejsou vystavovány těžkým zatěžovacím šokům. Není tedy nezbytně nutné, aby byly při těchto aplikacích používány řetězy s vyšší pevností v tahu než je 19 tsf (1,8 MPa) [24].

Plastový kolektorový řetěz NCS720S spojující hnané a hnací kolo je sestaven z jednotlivých článků (obr. 4.16), což umožňuje variabilní nastavení celkové délky řetězu. Pro experimentální sušárnu je zapotřebí 13 m řetězu pro spojení jednoho hnacího a jednoho hnaného kola. Celková potřebná délka plastového řetězu je tedy 26 m. Pro uchycení hrabicového systému přehrabováku (obr. 4.15) je použito 4 ks NCS720S patek včetně kolíků (obr. 4.16). Tento způsob uchycení je velice jednoduchý a usnadňuje manipulaci a polohovatelnost hrabicového přehrabovacího systému.



Obr. 4.16 Plastový řetěz s patkou [24]

4.2.3 Posouzení zatěžovaných prvků z hlediska zatížení vlastní hmotností a hmotností jednotlivých komponent

Ke správnému fungování systému je nutno posoudit hřídele z hlediska vnějších zatížení. Za předpokladu, že je systém pomaloběžný, bude docházet pouze k ohybu hřídelí vlivem vlastních hmotností jednotlivých komponent. Z kusovníku SU-2011-K lze snadno vyčíst hmotnosti jednotlivých komponent a určit tak celkové působení sil na hnací i hnanou hřídel.

a) Výpočet hmotností jednotlivých komponent

Hmotnost hřídele je dána materiálovou charakteristikou, délkou a průřezem. Hřídel je trubka z konstrukční ocele TR 89x10-3100 dle ČSN 42 5715 (viz. výkresová dokumentace HŘÍDEL 4-SU-2011-26. Rozměry dány tabulkovou normou jsou: $D = 89$ mm, $d = 69$ mm, tloušťka stěny = 8 mm, délka hřídele = 3100 mm, hmotnost jednoho metru takovéto trubky je = 17,42 kg/m. Celková hmotnost hřídele činí 54 kg.

Hmotnost ozubených kol je úměrně závislá na materiálu, z kterého jsou vyrobena. Všechna kola jsou totožná, s vnějším průměrem $d = 564,8$ mm, a jsou pevně připevněna k hřídelím pomocí přírub, jsou vyrobena z tvrzeného polyetyleny UHMWPE. Hmotnost jednoho takového kola je 10,6 kg.

Hmotnost řetězu je tabulkovou hodnotou, která se pohybuje okolo 2,22 kg/m. Jeden řetěz má délku 13 m, což udává celkovou hmotnost řetězu 29 kg. Je nutné ještě připočítat hmotnost patek, které jsou součástí řetězu a které připevňují hrabicový přehrabovací systém k řetězu. Hmotnost jedné patky je 0,28 kg/ks. Patky jsou v systému celkem čtyři.

Hmotnost hrabicového přehrabovacího systému je dána délkou, materiálem a průřezem čtvercové trubky, která je dominantní částí hrabicového přehrabovacího systému. Čtvercová trubka TR 4HR 90x70x5 – 2800 o délce 2800 mm a vyrobena

z konstrukční ocele 11 523 s povrchovou úpravou - pozink, má hmotnost 34,3 kg (viz. výkresová dokumentace HRABLO 4-SU-2011-06).

Dalšími prvky zatěžující hřídele vlastní hmotností jsou:
 Příruba dle výkresu č. 4-SU-2011-27 s celkovou hmotností 3,41 kg.
 Přehrabovací elementy, v tomto případě hřeby, s celkovou hmotností 5 kg/hrablo.

b) Ohybové deformace působící na hnanou hřídel (integrální přístup)

Na obrázku 4.17 resp. 4.18 jsou schematicky zobrazena silová působení na hnané hřídeli. Síly \vec{F}_1 a \vec{F}_2 znázorňují zatížení způsobené hmotností ozubených kol, plastového řetězu a přehrabováku, \vec{q} je liniové zatížení, které interpretuje vlastní tíhu hřídele a síly \vec{F}_A a \vec{F}_B jsou síly působící jako reakce na celkovou hmotnost hřídele.

Síly \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_A a \vec{F}_B byly stanoveny výpočtem celkové hmotnosti přehrabovacího zařízení Σm_C , které se skládá z hmotnosti hřídele m_{Sh} , hmotnosti ozubených kol m_{Sp} , hmotnosti řetězu m_{CH} , hmotnosti hrabicového systému přehrabováku m_R , hmotnosti přírub $m_{př}$, hmotnosti hnacího ozubeného kola m_{sb} a hmotnosti řetězových patek m_p .

$$\sum m_C = m_{Sh} + m_{Sp} + m_{Ch} + m_{Ra} = 2 \cdot 54 \text{ kg} + 4 \cdot 10,6 \text{ kg} + 2 \cdot 29 \text{ kg} + 2 \cdot 33,2 \text{ kg} + 6 \cdot 3,41 + 10,6 \text{ kg} + 4 \cdot 0,28 \text{ kg} = 306,98 \text{ kg} \quad (4.23)$$

Z těchto údajů lze již stanovit síly působící na hřídel. Hřídel zatěžují celkem čtyři síly. Síly $F_1 = F_2$, což jsou síly působící na hřídel vlivem hmotnosti ozubených kol, plastového řetězu a přehrabováku. Síly $F_A = F_B$ jsou síly, které jsou způsobeny interakcí celkové hmotnosti hřídele s příslušenstvím. Dále je pro stanovení bezpečnosti nutné znát vzdálenosti, ve kterých síly působí. Dle obrázku 4.16: $a = 30 \text{ mm}$, $b = 400 \text{ mm}$, $c = 2240 \text{ mm}$.

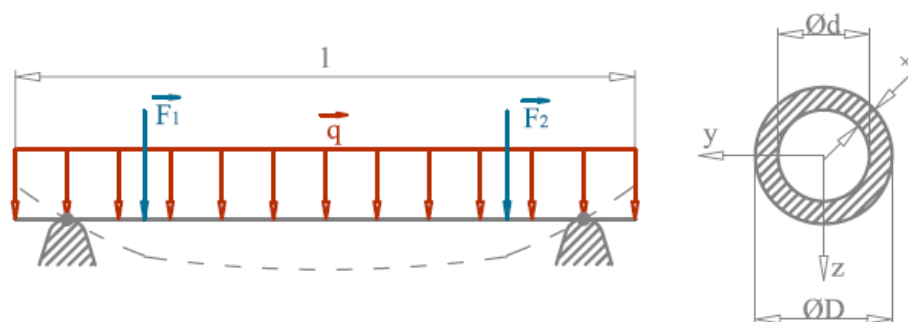
$$\text{Síla } F_1 = F_2 = (m_{Sp} + m_{CH}/4 + m_{př} + m_R/2) \cdot g = (10,6 + 14,5 + 3,41 + 16,6) \cdot 9,81 = 443 \text{ N}$$

$$\text{Síla } F_A = F_B = F_1 + m_{Sh} \cdot g = 443 + 54/2 \cdot 9,81 = 708 \text{ N}$$

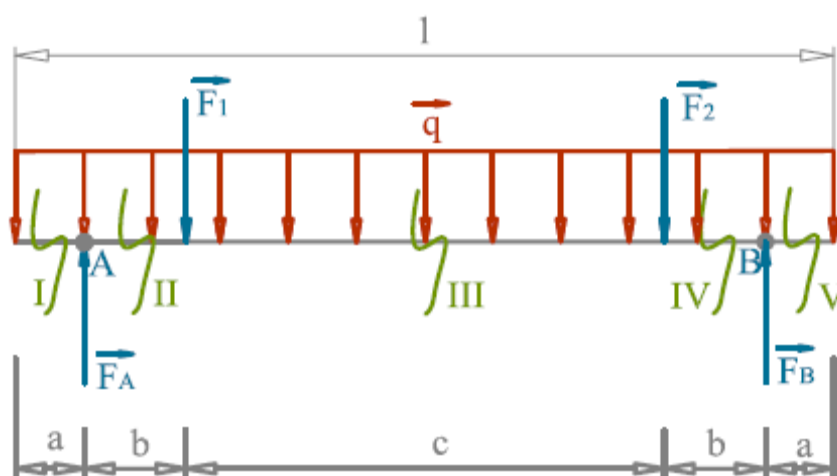
Pro výpočet jsou použity naddimenzované hodnoty vypočtených sil a to:

$F_1 = F_2 = 500 \text{ N}$ a pro $F_A = F_B = 800 \text{ N}$, je to z důvodu možnosti přítomnosti dalších přítomných či přidaných zatěžujících sil.

Liniové zatížení \vec{q} je dáno hmotností hřídele: $\vec{q} = 180 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

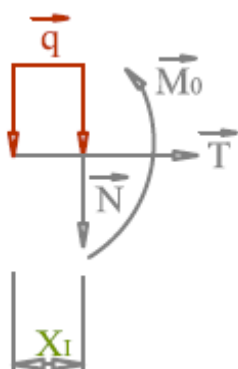


Obr. 4.17 Schematicky znázorněné zatížení hnané hřídele



Obr. 4.18 Schematicky znázorněné uvolnění hnané hřídele

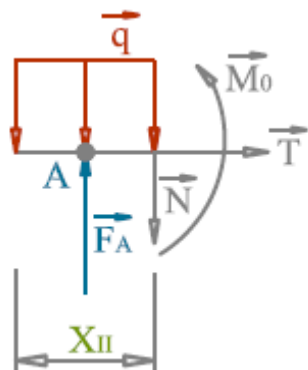
I. Interval $x \in (0, a)$



Obr. 4.19 Schematicky znázorněné působení sil v I. intervalu

$$M_0^I(x) = q \cdot \frac{(x_I)^2}{2} = 180 \cdot \frac{0,03^2}{2} = 0,081 \text{ Nm} \quad (4.24)$$

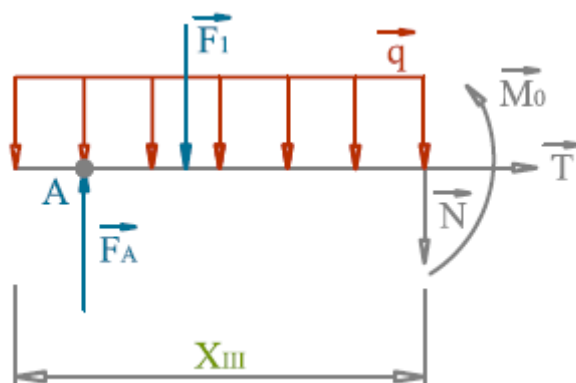
II. Interval $x \in (0, a + b)$



Obr. 4.20 Schematicky znázorněné působení sil v II. intervalu

$$M_0^{II}(x) = q \cdot \frac{(x_{II})^2}{2} - F_A \cdot (x_{II} - a) = 180 \cdot \frac{0,43^2}{2} - 800 \cdot (0,43 - 0,03) = -303,4 \text{ Nm}$$

(4. 25)

III. Interval $x \in (0, a + b + c)$ 

Obr. 4.21 Schematicky znázorněné působení sil v III. intervalu

$$M_0^{III}(x) = q \cdot \frac{(x_{III})^2}{2} - F_A \cdot (x_{III} - a) + F_1 \cdot (x_{III} - a - b) = 180 \cdot \frac{1,55^2}{2} - 800 \cdot (1,55 - 0,03) + 500 \cdot (1,55 - 0,03 - 0,4) = -439,8 \text{ Nm}$$

(4. 26)

Momenty ve IV. a V. intervalu není potřeba počítat. Vzhledem k osové souměrnosti hřídele je moment $M_0^{IV}(x) = M_0^{II}(x)$ a $M_0^V(x) = M_0^I(x)$ až na to, že momenty působí v opačném směru, mají tedy opačná znaménka. $M_0^{IV}(x) = 303,4 \text{ Nm}$ a moment $M_0^V(x) = -0,081 \text{ Nm}$.

Z vypočtených momentů je zřejmé, že největší zatížení bude probíhat ve III. Intervalu:

$$M_{0\max} = -439,8 \text{ Nm}$$

Z vypočtených momentů je nutné stanovit maximální moment $M_{0\max}$ [MPa] působící v nejvíce ohroženém místě.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{0\max}}{W_0} = \frac{M_{0\max} \cdot 32}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]} = \frac{-439,8 \cdot 32}{\pi \cdot 0,085^3 \left[1 - \left(\frac{0,069}{0,085} \right)^4 \right]} = 12,89 \text{ MPa} \quad (4.27)$$

kde W_0 je příčný průřez materiálem, pro tyč s kruhovým průměrem W_0 [N/m]:

$$W_0 = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (4.28)$$

Výpočet bezpečnosti pro daný materiál (konstrukční ocel 11.523, pro kterou $\sigma_{\max}=345 \text{ MPa}$).

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{\max}} = \frac{345 \text{ MPa}}{12,89 \text{ MPa}} = 26,8 \quad (4.28)$$

Z výsledku je patrné, že hnaná hřídel je v bezpečném rozmezí a nedojde tedy k jejímu poškození. Předimenzování je z důvodu sice pomaloběžného, ale ne úplně zanedbatelného rotačního pohybu, dále z agresivního prostředí, ve kterém je zařízení umístěno a dále z důvodu neúplně známého umístění sušárny.

Maximální průhyb hřídele lze vypočítat diferenciálním přístupem. Oblast největšího průhybu bude v místě největšího namáhání – střed hřídele, tedy v $x_w = \frac{l}{2} = 1550 \text{ mm}$,

$$\text{kde působí moment } M_0'''(x) = q \cdot \frac{(x_{III})^2}{2} - F_A \cdot (x_{III} - a) + F_1 \cdot (x_{III} - a - b). \quad (4.29)$$

Pro výpočet průhybu $w''(x) = -\frac{M_0''(x)}{E \cdot J}$, kde E je Youngův modul pružnosti [Pa] a J je kvadratický moment [m^4], je potřeba určit 1. a 2. integraci momentu $M_0'''(x)$.

$$\begin{aligned}
EJ \cdot w''(x) &= -q \cdot \frac{x_{III}^2}{2} + F_A \cdot (x_{III} - a) - F_{I.} (x_{III} - a - b) \\
EJ \cdot w'(x) &= -q \cdot \frac{x_{III}^3}{6} + F_A \cdot \frac{x_{III}^2}{2} - F_A \cdot a \cdot x_{III} - F_{I.} \cdot \frac{x_{III}^2}{2} - F_{I.} \cdot a \cdot x_{III} - F_{I.} \cdot b \cdot x_{III} \\
EJ \cdot w(x) &= -q \cdot \frac{x_{III}^4}{24} + F_A \cdot \frac{x_{III}^3}{6} - F_A \cdot a \cdot \frac{x_{III}^2}{2} - F_{I.} \cdot \frac{x_{III}^3}{6} + F_{I.} \cdot a \cdot \frac{x_{III}^2}{2} + \\
&+ F_{I.} \cdot b \cdot \frac{x_{III}^2}{2} \Rightarrow \\
\Rightarrow w(x) &= \frac{-q \cdot \frac{x_{III}^4}{24} + F_A \cdot \frac{x_{III}^3}{6} - F_A \cdot a \cdot \frac{x_{III}^2}{2} - F_{I.} \cdot \frac{x_{III}^3}{6} + F_{I.} \cdot a \cdot \frac{x_{III}^2}{2} + F_{I.} \cdot b \cdot \frac{x_{III}^2}{2}}{E \cdot \frac{\frac{\pi \cdot D^4}{64} - \frac{\pi \cdot d^4}{64}}{\frac{D}{2}}} \\
&= \frac{-180 \cdot \frac{1,55^4}{24} + 800 \cdot \frac{1,55^3}{6} - 800 \cdot 0,03 \cdot \frac{1,55^2}{2} - 500 \cdot \frac{1,55^3}{6} + 500 \cdot 0,03 \cdot \frac{1,55^2}{2} + 500 \cdot 0,4 \cdot \frac{1,55^2}{2}}{210 \cdot 10^9 \cdot \frac{\frac{\pi \cdot 0,085^4}{64} - \frac{\pi \cdot 0,069^4}{64}}{\frac{0,085}{2}}} = \\
&= 0,000051979 \text{ m} = 0,052 \text{ mm}
\end{aligned}$$

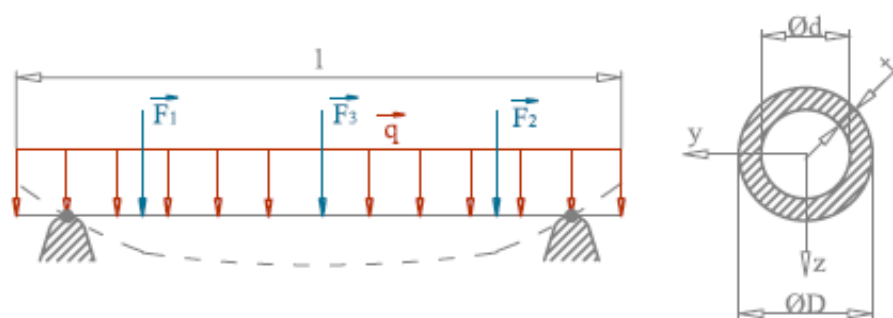
(4. 30)

Výsledkem výpočtu je maximální průhyb, který může, v krajním případě, nastat. Maximální průhyb v nejméně bezpečném místě může být 0,052 mm. Již z výpočtu bezpečnosti bylo zjištěno, že je hřídel mírně předimenzován, důvody již byly zmíněny.

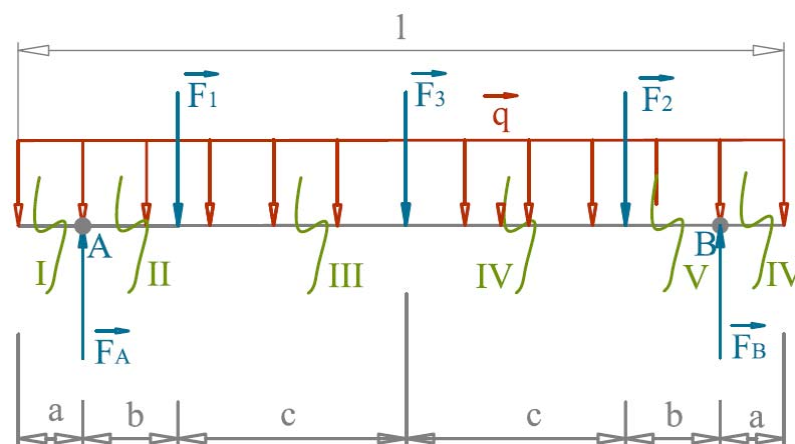
c) Ohybové deformace působící na hnací hřídel (integrální přístup)

Na obrázku 4.21 respektive 4.22 jsou schematicky zobrazena silová působení na hnací hřídeli. Velikosti sil jsou totožné se silami stanovenými při výpočtu ohybových deformací působících na hnané hřídeli (viz. výše).

Síly \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 , \vec{F}_A a \vec{F}_B , liniové zatížení \vec{q} byly stanoveny výpočtem celkové hmotnosti přehrabovacího zařízení Σm_C , které byly již stanoveny výše.

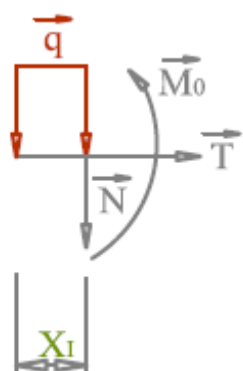


Obr. 4.21 Schematicky znázorněné zatížení hřídele a její průřez



Obr. 4.22 Schematicky znázorněné uvolnění hřídele

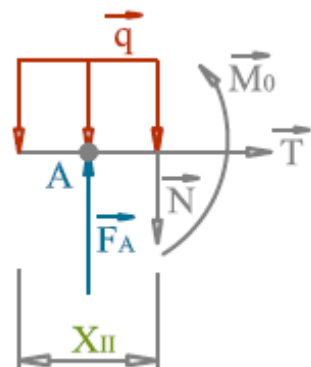
I. Interval $x \in (0, a)$



Obr. 4.23 Schematicky znázorněné působení sil v I. intervalu

$$M_0^I(x) = q \cdot \frac{(x_I)^2}{2} = 180 \cdot \frac{0,03^2}{2} = 0,081 \text{ Nm} \quad (4.31)$$

II. Interval $x \in (0, a + b)$

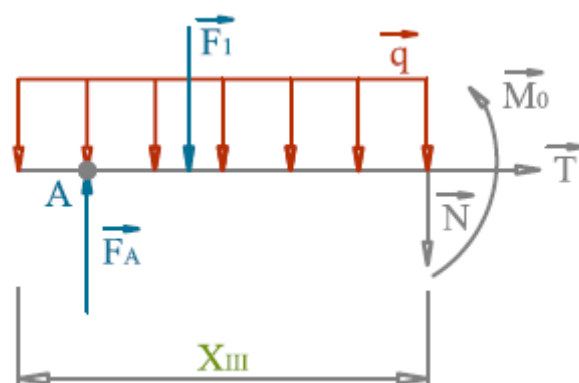


Obr. 4.24 Schematicky znázorněné působení sil v II. intervalu

$$M_0^{II}(x) = q \cdot \frac{(x_{II})^2}{2} - F_A \cdot (x_{II} - a) = 180 \cdot \frac{0,43^2}{2} - 800 \cdot (0,43 - 0,03) = -303,4 \text{ Nm}$$

(4. 32)

III. Interval $x \in (0, a + b + c)$

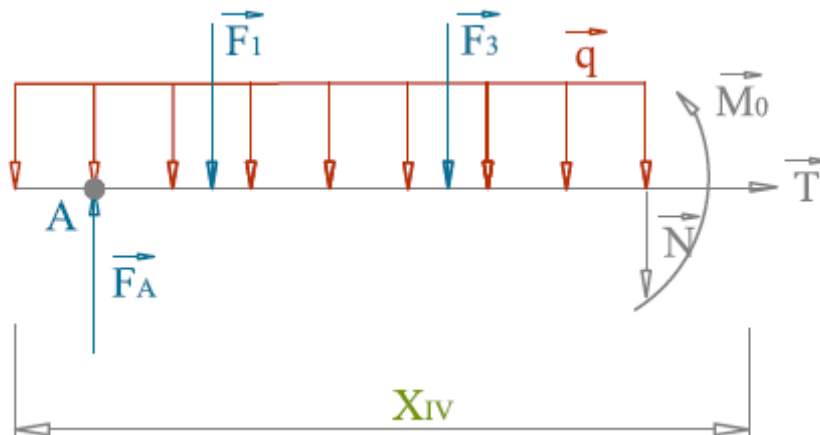


Obr. 4.25 Schematicky znázorněné působení sil v III. intervalu

$$M_0^{III}(x) = q \cdot \frac{(x_{III})^2}{2} - F_A \cdot (x_{III} - a) + F_1 \cdot (x_{III} - a - b) = 180 \cdot \frac{1,55^2}{2} - 800 \cdot (1,55 - 0,03) + 500 \cdot (1,55 - 0,03 - 0,4) = -439,8 \text{ Nm}$$

(4. 33)

IV. Interval $x \in (0, a + b + 2c)$



Obr. 4.26 Schematicky znázorněné působení sil v IV. intervalu

$$M_0^{IV}(x) = q \cdot \frac{(x_{IV})^2}{2} - F_A \cdot (x_{IV} - a) + F_1 \cdot (x_{IV} - a - b) + F_3 \cdot (x_{IV} - a - b - c) = 180 \cdot \frac{2,67^2}{2} - 800 \cdot (2,67 - 0,03) + 500 \cdot (2,67 - 0,03 - 0,4) + 200(2,67 - 1,55) = -768 \text{ Nm}$$

(4.34)

Z vypočtených momentů je zřejmé, že největší zatížení bude probíhat ve IV. Intervalu:

$$M_{0 \max} = -768 \text{ Nm}$$

Z vypočtených momentů je nutné stanovit maximální moment $M_{0 \max}$ [MPa] působící v nejvíce ohroženém místě.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{0 \max}}{W_0} = \frac{M_{0 \max} \cdot 32}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]} = \frac{-768 \cdot 32}{\pi \cdot 0,085^3 \left[1 - \left(\frac{0,069}{0,085} \right)^4 \right]} = 22 \text{ MPa}$$

(4.35)

kde W_0 je příčný průřez materiálem, pro tyč s kruhovým průměrem W_0 [N/m]:

$$W_0 = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$$

(4.36)

Výpočet bezpečnosti pro daný materiál (konstrukční ocel 11.523, pro kterou $\sigma_{\max}=345 \text{ MPa}$).

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{\max}} = \frac{345 \text{ MPa}}{22 \text{ MPa}} = 15,7 \quad (4.37)$$

Z výsledku je patrné, že hnací hřídel je v bezpečném rozmezí a nedojde tedy k jejímu poškození. Předimenzování je z důvodu umístění hnaného ozubeného kola, které je řetězem propojeno s pohonnou jednotkou.

Maximální průhyb hřídele lze vypočítat diferenciálním přístupem. Oblast největšího průhybu bude v opět místě největšího namáhání – střed hřídele, tedy v $x_w = \frac{l}{2} = 1550 \text{ mm}$, kde působí moment:

$$M_0^{IV}(x) = q \cdot \frac{(x_{IV})^2}{2} - F_A \cdot (x_{IV} - a) + F_1 \cdot (x_{IV} - a - b) + F_3 \cdot (x_{IV} - a - b - c). \quad (4.38)$$

Pro výpočet průhybu bude opět použit vztah:

$$w''(x) = -\frac{M_0''(x)}{E \cdot J}, \text{ kde } E \text{ je Youngův modul pružnosti [Pa] a } J \text{ je kvadratický moment [m}^4\text{], je potřeba určit 1. a 2. integraci momentu } M_0^{IV}(x).$$

$$\begin{aligned}
EJ \cdot w''(x) &= -q \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_A \cdot (x_{IV} - a) - F_1 \cdot (x_{IV} - a - b) + F_3 \cdot (x_{IV} - a - b - c) \\
EJ \cdot w'(x) &= -q \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} + F_A \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} - F_A \cdot a \cdot x_{IV} - F_1 \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_1 \cdot a \cdot x_{IV} + F_1 \cdot b \cdot x_{IV} - F_3 \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + \\
&+ F_3 \cdot a \cdot x_{IV} + F_3 \cdot b \cdot x_{IV} + F_3 \cdot c \cdot x_{IV} \\
EJ \cdot w(x) &= -q \cdot \frac{x_{IV}^4}{24} + F_A \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} - F_A \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} - F_1 \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} + F_1 \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_1 \cdot b \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} - \\
&- F_3 \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} + F_3 \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_3 \cdot b \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_3 \cdot c \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} \\
&- q \cdot \frac{x_{IV}^4}{24} + F_A \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} - F_A \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} - F_1 \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} + F_1 \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_1 \cdot b \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} - F_3 \cdot \frac{x_{IV}^3}{6} + \\
&+ F_3 \cdot a \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_3 \cdot b \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} + F_3 \cdot c \cdot \frac{x_{IV}^2}{2} \\
\Rightarrow w(x) &= \frac{\frac{\pi \cdot D^4}{64} - \frac{\pi \cdot d^4}{64}}{E \cdot \frac{D}{2}} \\
&- 180 \cdot \frac{2,67^4}{24} + 800 \cdot \frac{2,67^3}{6} - 800 \cdot 0,03 \cdot \frac{2,67^2}{2} - 500 \cdot \frac{2,67^3}{6} + 500 \cdot 0,03 \cdot \frac{2,67^2}{2} + \\
&500 \cdot 0,4 \cdot \frac{2,67^2}{2} - 200 \cdot \frac{2,67^3}{6} + 200 \cdot 0,03 \cdot \frac{2,67^2}{2} + 200 \cdot 0,4 \cdot \frac{2,67^2}{2} + 200 \cdot 1,12 \cdot \frac{2,67^2}{2} = \\
&\frac{\frac{\pi \cdot 0,085^4}{64} - \frac{\pi \cdot 0,069^4}{64}}{210 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,085}{2}} \\
&= 0,00024 \text{ m} = 0,24 \text{ mm}
\end{aligned}$$

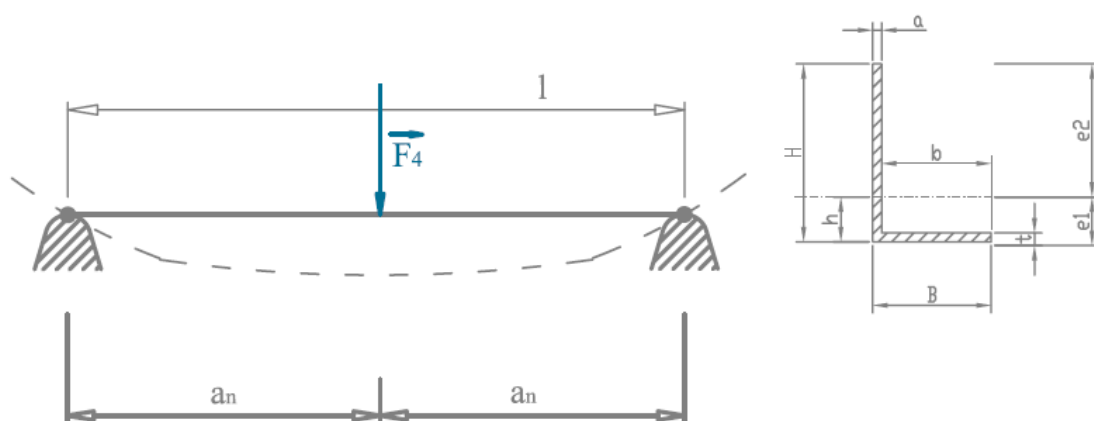
(4. 39)

Výsledkem výpočtu je maximální průhyb, který může, v krajním případě, nastat na hnací hřídeli. Maximální průhyb v nejméně bezpečném místě může být 0,24 mm. Již z výpočtu bezpečnosti bylo zjištěno, že je hřídel mírně předdimenzována, důvody již byly zmíněny.

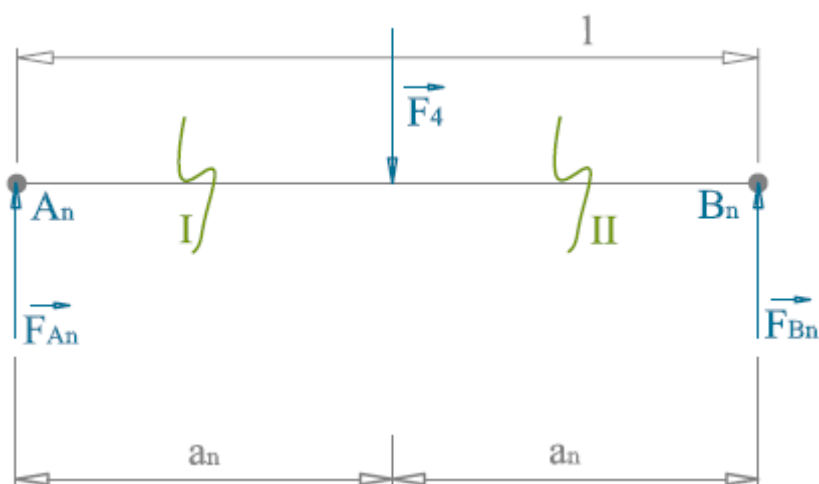
d) Ohybové deformace působící na nosník konstrukce přehrabováku (integrální přístup)

Na obrázku 4.27 respektive 4.28 jsou schematicky zobrazena silová působení na nosník. Velikosti sil jsou dány hmotností jednotlivých komponent přehrabováku a byl vypočten výše.

Síly \vec{F}_4 , \vec{F}_{An} a \vec{F}_{Bn} byly stanoveny výpočtem celkové hmotnosti přehrabovacího zařízení Σm_C , které byly již stanoveny výše.



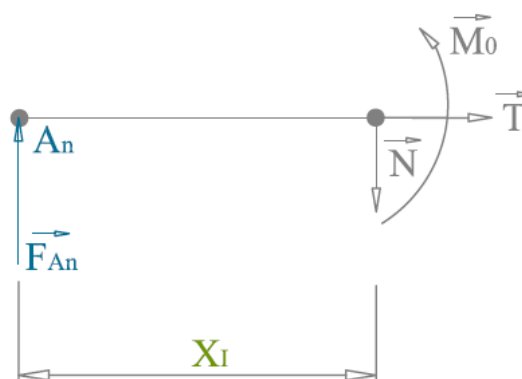
Obr. 4.27 Schematicky znázorněné zatížení nosníku a jeho průřez



Obr. 4.28 Schematicky znázorněné uvolnění nosníku

I. Interval $x_I \in (0, a_n)$

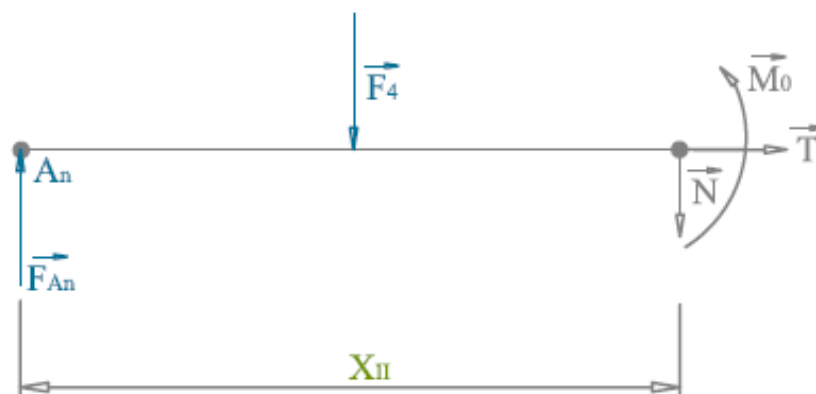
$$M_0^I(x) = -F_{An} \cdot x_I = 400 \cdot 0,475 = -190 \text{ Nm} \quad (4.40)$$



Obr. 4.29 Schematicky znázorněné působení sil v I. Intervalu

I. Interval $x_{II} \in (0, 2a_n)$

$$M_0^I(x) = -F_{An} \cdot x_{II} + F_4 \cdot (x_{II} - a_n) = -400 \cdot 0,95 + 800 \cdot (0,95 - 0,475) = 0 Nm \quad (4.41)$$



Obr. 4.30 Schematicky znázorněné působení sil v II. Intervalu

Z vypočtených momentů je zřejmé, že největší zatížení bude probíhat ve I. intervalu:

$$M_{0\max} = -190 Nm$$

Z vypočtených momentů je nutné stanovit maximální moment $M_{0\max}$ [MPa] působící v nejvíce ohroženém místě.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{0\max}}{W_0} \quad (4.42)$$

kde W_0 je příčný průřez materiálem, pro L – profil W_0 [N/m]:

$$W_{01} = \frac{Jx}{e_1} = \frac{75661,362}{19,03} = 3975,9 \text{ mm}^3$$

$$W_{02} = \frac{Jx}{e_2} = \frac{75661,362}{40,97} = 1846,75 \text{ mm}^3$$

(4. 43)

(4. 44)

kde Jx je kvadratický moment [m^4] L-profilu:

$$Jx = \frac{1}{3}(B \cdot e_1^3 - b \cdot h^3 + a \cdot e_2^3) = \frac{1}{3}(40 \cdot 19,03^3 - 37 \cdot 19,03^3 + 3 \cdot 40,97^3) = 75661,362 \text{ m}^4$$

(4.45)

$$e_1 = \frac{a \cdot H^2 + b \cdot t^2}{2(a \cdot H + b \cdot t)} = \frac{3 \cdot 60^2 + 37 \cdot 3^2}{2(3 \cdot 60 + 37 \cdot 3)} = 19,03 \text{ mm} \quad a \quad e_2 = H - e_1 = 60 - 19,03 = 40,97 \text{ mm}$$

(4.46)

Výpočet napětí pro dané průřezy:

$$\sigma_{\max 1} = \frac{M_{0 \max}}{W_{01}} = \frac{-190}{3975,9 \cdot 10^{-9}} = 47,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max 2} = \frac{M_{0 \max}}{W_{02}} = \frac{-190}{1846,75 \cdot 10^{-9}} = 102,9 \text{ MPa}$$

(4.47)

Stanovení bezpečnosti pro jednotlivá napětí:

$$k_{k1} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{\max 1}} = \frac{345}{47,8} = 7,2$$

$$k_{k2} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{\max 2}} = \frac{345}{102,9} = 3,4$$

(4.48)

Z výsledku je patrné, že nosník je v bezpečném rozmezí a nedojde tedy k jeho poškození. Předimenzování je z důvodu možnosti dalšího zatížení nosníku či hřídelí.

Maximální průhyb nosníku lze vypočítat diferenciálním přístupem. Oblast největšího průhybu bude v opět místě největšího namáhání – střed nosníku, tedy v

$$x_{wn} = \frac{l_n}{2} = 475 \text{ mm}, \text{ kde působí moment:}$$

$$M_0^I(x) = -F_A \cdot x_I.$$

Pro výpočet průhybu bude opět použit vztah:

$w''(x) = -\frac{M_0''(x)}{E \cdot J}$, kde E je Youngův modul pružnosti [Pa] a J_x je kvadratický moment [m^4], je potřeba určit 1. a 2. integraci momentu $M_0^I(x)$.

$$EJ \cdot w''(x) = -F_A \cdot x_I$$

$$EJ \cdot w'(x) = -F_A \cdot \frac{x_I^2}{2}$$

$$EJ \cdot w(x) = -F_A \cdot \frac{x_I^3}{6}$$

$$\Rightarrow w(x) = \frac{-F_A \cdot \frac{x_I^3}{6}}{E \cdot Jx} = \frac{-400 \cdot \frac{0,475^3}{6}}{210 \cdot 10^9 \cdot 75661,362 \cdot 10^{-9}} = 0,000449 \text{ m} = 0,45 \text{ mm}$$

(4. 39)

Výsledkem výpočtu je maximální průhyb, který může v krajním případě, nastat na nosníku. Maximální průhyb v nejméně bezpečném místě může být 0,45 mm. Již z výpočtu bezpečnosti bylo zjištěno, že je nosník mírně předimenzován, důvody již byly zmíněny.

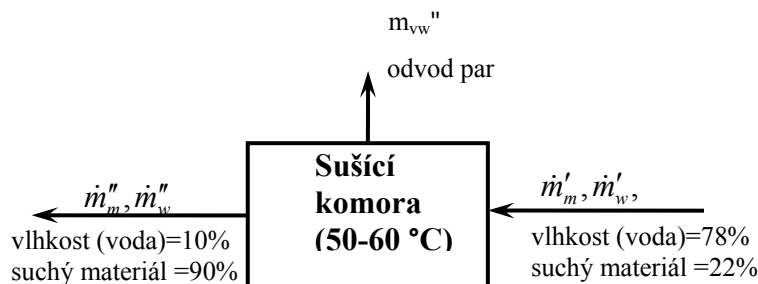
4.3 Materiálová a tepelná bilance sušárny

4.3.1 Materiálová bilance

Pro stanovení rychlosti sušení odvodněného kalu je potřeba znalosti základních vlastností sušeného materiálu, prostředí, ve kterém k sušení bude docházet, ale je potřeba znát i geografické umístění sušárny. Všechny tyto faktory jsou známé, avšak jen teoreticky, přesné údaje budou známy až po provedení několika testů, k nimž je sušárna určen

Hodnoty na vstupu do sušárny jsou dané charakteristikou materiálu. Vstupní vlhkost materiálu je 72-78 % a požadovaná vlhkost na výstupu ze sušárny je taktéž dána, 10 %. Umístění sušárny bude v areálu ČOV Modřice, z čehož vyplývají další specifiky, která budou použita při výpočtu rychlosti sušení.

Než bude přistoupeno k samotnému výpočtu, je dobré načrtnout proudové schéma (obr. 4.31):



Obr. 4.31 Proudové schéma teoretické sušárny

Pro zjednodušení výpočtu bude bilance vztažena na 1 kg sušeného vlhkého materiálu. Po zavedení tohoto předpokladu bude materiálová bilance vypadat následovně:

$$m_m' + m_w' = m_m'' + m_w'' + m_{vw}'' \quad (4.40)$$

m_m' je množství suchého materiálu na vstupu do sušárny [kg]

m_w' je množství vlhkosti materiálu na vstupu do sušárny [kg]

m_m'' je množství suchého materiálu na výstupu ze sušárny [kg]

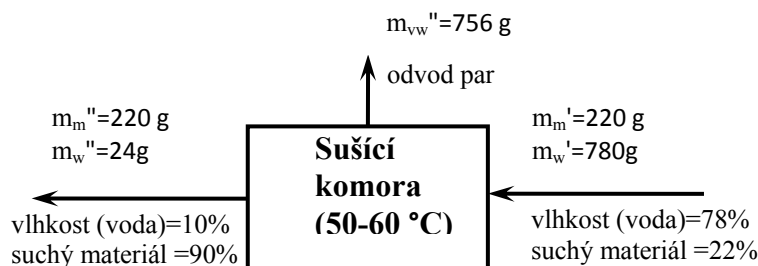
m_w'' je množství vlhkosti materiálu na výstupu ze sušárny [kg]

m_{vw}'' je množství odpařené vody [kg]

$$\Rightarrow m_{vw}'' = m_m' + m_w' - m_m'' - m_w'' = 220 + 780 - 220 - 24 = 756 \text{ g}$$

$m_{vw}'' = 756 \text{ g}$ a jedná se o množství vlhkosti (vody), kterou je nutné odpařit z 1 kg sušeného materiálu, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností materiálu na výstupu ze sušárny (90 % sušiny).

Po numerickém určení jednotlivých množství, bude proudové schéma vypadat následovně (obr. 4.32):



Obr. 4.32 Materiálová bilance sušení vztažená na 1 kg vstupního materiálu

4.3.2 Tepelná bilance

Teplo se skládá z dodaného tepla potřebného k ohřátí materiálu ze vstupní teploty materiálu na požadovanou teplotu (4.41) a z tepla přijatého (odevzdaného) tělesem dané hmotnosti při změně skupenství (4.42).

$$Q_{\text{tepelné výměny}} = (m_m' + m_w') \cdot c_{ss} \cdot (t_{ch} - t_m) \quad (4.41)$$

$(m_m' + m_w')$ je hmotnost sušeného materiálu [kg]

c_{ss} je měrná tepelná kapacita sušeného materiálu [kJ/kg·°C]

$$c_{ss} = 4,18 \cdot 0,78 + 1,5 \cdot 0,22 = 3,59 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

t_{ch} je teplota při které dochází k sušení [°C]

t_m je teplota sušeného materiálu při vstupu do sušárny [°C]

$$Q_{\text{změny skupenství}} = m_{vw}'' \cdot l_{60^\circ\text{C}} \quad (4.42)$$

m_{vw}'' je hmotnost vody nutné k vypaření [kg]

$l_{60^\circ\text{C}}$ je měrné skupenské teplo při teplotě sušení (hodnota z tabulek) [kJ/kg]

Celková teplo potřebné k vypaření vody obsažené v materiálu je:

$$Q_{\text{celk}} = Q_{\text{tepelné výměny}} + Q_{\text{změny skupenství}} = (m'_m + m'_w) \cdot c_{ss} \cdot (t_{\text{ch}} - t_m) + m_v'' \cdot l_{50^\circ\text{C}} \quad (4.43)$$

$$Q_{\text{celk}} = 1 \cdot 3,59 \cdot (60 - 21) + 0,756 \cdot 2358 = 1922,7 \text{ kJ} \quad (4.44)$$

K vypaření 0,756 g vody z 1 kg vlhkého materiálu (22 % sušiny) je potřeba dodat 1945,7 kJ tepelné energie.

Za předpokladů, že 1 kg sušeného materiálu tvoří 1 dm³, a že na jihovýchodním území ČR dosahuje sluneční energie 4000 MJ/m² za rok, což je 456 kJ/m² za hodinu, dojde k usušení 1 kg vlhkého materiálu:

$$\tau = \frac{Q_{\text{celk}}}{Q_{\text{slunce}}} = \frac{1922,7}{456} = 4,22 \text{ h} \quad (4.45)$$

K usušení 1 kg vlhkého materiálu, na přímém slunci, dojde za 4,22 hodiny. V sušící komoře jsou však lepší podmínky k sušení (jednak dochází k rychlejšímu odpařování vázané vody a jednak k fermentaci), tím pádem dojde ke zkrácení potřebného času sušení. K tomuto účelu je sušárna realizována, k získání přesnějších informací, které lze jen těžko určit teoretickou cestou (výpočtem).

4.4 Provozní a pořizovací náklady

Celkové finanční náklady experimentální solární sušárny se skládají z pořizovacích a provozních nákladů. V pořizovacích nákladech je zahrnuto veškeré zařízení s příslušenstvím sušárny. Finanční bilance je pouze orientační a ceny nejsou směrodatné (obr. 4.33). Je to z důvodu nezrealizovaných některých komponent. Již nakoupené a zrealizované komponenty jsou: celý skelet komory sušárny skládající se z různých typů konzol (viz. kusovník a výkresová dokumentace), šroubů, matic a podložek, bočnic a podélných spojek. Mezi dále vyhotovené a nakoupené komponenty patří kolektorový řetěz s lopatkami na přichycení přehrabováku a ozubená kola. Zbývající zařízení, které již bylo vybráno, pro realizaci experimentální solární sušárny jsou: dva kusy hřídelí, přehrabovák a motor s převodovkou. Provozní náklady jsou dány pouze spotřebou energie pro pohon přehrabovacího systému a obsluhou, která však bude minimální. (0,18 kW při 476 h/měsíc což je asi 180 Kč/měsíc při tarifu 2,10 Kč/kWh).

Zařízení	Označení	Počet kusů/délka	Cena	Poznámka
1. Komora sušárny:	2-SU-2011-00	1ks	38 000,-	790 kg
1.2 Konzola (1m)	4-SU-2011-01	42ks		pozinkováno
1.3 Konzola (0,5m)	4-SU-2011-02	42ks		pozinkováno
1.4 Konzola rohová	4-SU-2011-03	14ks		pozinkováno
1.5 Konzola střešní	4-SU-2011-04	7ks		pozinkováno
1.6 Spojka podélná	4-SU-2011-08	56ks		pozinkováno
1.7 Spojka podélná	4-SU-2011-09	4ks		pozinkováno
1.8 Bočnice	4-SU-2011-10	12ks		pozinkováno

Návrh experimentální solární sušárny

1.9 Spojovací materiál	ČSN 02 1108			
2. Přehrabovací zařízení		1ks	42 000,-	310 kg
2.1 Řetězové kolo	4-SU-2011-07	5ks		
2.2 Kolektorový řetěz	270 E 363	29m		
2.3 Patka		4ks		
2.4 Hrablo	4-SU-2011-06	2ks		
2.5 Hřídel s přírubou	4-SU-2011-05	2ks		obrobeno
2.6 Ložisko s uložením	4-SU-2011-12	4ks		
3. Kaširovaná fólie			2000,-	50 m ²
4. Elektromotor s přímou převodovkou	NORD SK 02-63L	1ks	3000,-	0,18kW
CELKOVÁ CENA			Cca 85 000,-	

Tab. 4.33 Přehled komponenta - cena

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést návrh experimentální solární sušárny pro výzkum a vývoj sušení čistírenských kalů pomocí alternativních zdrojů energie. Hlavními částmi návrhu bylo zhotovení výkresové dokumentace navržené sušicí komory a přehrabovacího zařízení, výběr materiálu pro konstrukci, výroba podle této dokumentace a vhodná volba pohonu přehrabovacího zařízení.

Konstrukce sušicí komory byla řešena jako kompaktní, výškově i délkově nastavitelná, lehce rozebíratelná a přenositelná. S požadavky na rozebíratelnost sušárny souvisí i rozměr sušicí komory 6 x 3 m. Při výběru materiálu konstrukce musel být brán ohled na agresivitu prostředí a vysokou vlhkost v sušicí komoře. Byla pro to vybrána konstrukční ocel s povrchovou úpravou – pozinkováním. Spodní část komory tvoří „vana“ z pozinkované konstrukční oceli bez vlastní podlahy, která není nutná pro experimentální sušení kalu s danými fyzikálními vlastnostmi. Výška vany byla navržena tak, aby bylo možné uložit libovolné množství kalu až do výšky půl metru. Střecha komory je tvořena bočními a střešními konzolami, na kterých jsou připraveny úchytné prvky na rozvod potrubí s ventilátory. Komora je zavětrována systémem chemických kotev, které fixují komoru k podložce sušárny, a různými podpěrnými systémy. Výběr konstrukce je podložen výpočtem vnějších i vnitřních zatížení dle Eurokódu.

Základními prvky přehrabovacího systému jsou dva nekonečně dlouhé plastové řetězy uložené podél bočních stěn sušicí komory. Umístění a správný provoz řetězů vyžadoval vyřešit spoustu detailů. Průhyb řetězů byl jeden z vážnějších problémů. Na pěti metrech délky může dojít k nežádoucímu průvěsu řetězu a následnému nedokonalému přehrabování nebo dokonce poničení zařízení. Tento problém byl vyřešen napínáky řetězů. Každý řetěz může být napínán libovolně a zvláště, což může zapříčinit neharmonizované obíhání řetězů a následnou nefunkčnost zařízení. Nesprávně vypnutý řetěz může též způsobit nesprávné nabíhání na ozubená vodící kola a opět způsobit nefunkčnost zařízení. Je-li tedy řetěz správně vypnut, nejsou zapotřebí různá příslušenství, jako jsou vodící lišty a různé podpěry po celé délce sušicí komory.

Systém hřídele a ozubených kol měl několik možných variant. Bylo možno vzít v úvahu jednu točící se hřídel s ozubenými koly na pevnou a druhou statickou hřídel s otáčejícím se koly. Tato možnost však neřešila problém s harmonizací pohybu obou řetězů. Hrozilo nesourodé otáčení se a tím i nesprávné přehrabování či poškození systému. Tento fakt byl vyřešen dvěma totožnými hřídeli. Na obě hřídele byla kola fixována napevno a tím byl vyřešen problém s harmonizací pohybu. Hřídele jsou fixovány ke konstrukci přes valivá ložiska s uložením. Systém hřídelí s ozubenými koly a valivými ložisky byl též posouzen na bezpečnost a maximální průhyb hřídele v nejrizikovějším místě.

Přehrabovací zařízení bylo potřeba vyřešit z důvodu nesprávného nebo neúplného přehrabávání. Bylo nutné najít takový systém přehrabávání, aby kal nebyl provzdušňován jen na povrchu, ale i ve spodních vrstvách, tento problém souvisí i se správným vypnutím řetězů. Se správnou hmotností dojde k efektivnímu gravitačnímu přehrabávání a není nutné řešit složitý a komplikovaný systém lišt a vodících zařízení přehrabováku. Hrabice na přehrabovacím zařízení byly vyřešeny jednoduše. Tvoří je systém hřebů, který může být kdykoliv vyměněn za jiný systém hrabíc s variabilním profilem. Tento proces může být předmětem dalšího výzkumu či optimalizace.

Pohon zajišťuje elektromotor s čelní převodovkou. Dimenzování motoru a převodovky na pohon přehrabovacího zařízení vyplývá z požadované rychlosti přehrabování sušeného kalu a hmotnosti pohyblivé části přehrabováku. Problém s uchycením motoru a převodovky byl vyřešen jednak výběrem zařízení, které se sestává z elektromotoru i převodovky, a jednak přímým uchycením pohonu přímo k podložce (podlaze).

Výsledky práce přispějí k řešení projektu NPV II 2B08048 „Odpady jako surovina a zdroje energie“.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Internetový portál společnosti Freeze Dryer Systems Europe [online]. Dostupné z <<http://www.freeze-dryers.eu/>>.
- [2] Šesták, J. – Žitný, R.: Tepelné pochody II – výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. Skripta ČVUT Praha, 2006.
- [3] Vitázek, I.: Chladienie a chladiarenstvo a sušenie a sušiarstvo. Nitra, SPU, 2000. 123 s.
- [4] Incropera, F.P. – DeWitt, D.P – Bergman, T.L – Lavine A.S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 2001. 944 s.
- [5] Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7
- [6] Kothandaraman, C.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Delhi. New Age International (P) Ltd. 2006. 713 s.
- [7] Stehlík, P. – Kohoutek, J. – Němčanský, J.: Tepelné pochody – výpočet výměníku tepla. Skripta VUT Brno, 1991. 129 s.
- [8] Hovorka, F.: Technologie chemických látek. Skripta VŠCHT Praha, 2005. 181 s.
- [9] Vacek, V. – Nožička, J.: Termodynamika pro posluchače páteho semestru základního studia fakulty strojní ČVUT v Praze. Skripta ČVUT Praha, 1993. 95 s.
- [10] Stejskal, B.: Přednášky pro posluchače třetího ročníku fakulty strojní, obor Technická aplikovaná ekologie - Úpravy vody.
- [11] Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů [online]. Dostupné z <<http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy2005/Bara/index.html>>.
- [12] Odpadové hospodářství, ekonomika životního prostředí [online]. Zveřejněno dne: 8.12. 2006. [cit. 4.února 2010]. Dostupné z <<http://odpady.ihned.cz/c1-19924430-technologicke-moznosti-zpracovani-cistirenskych-kalu>>.
- [13] Ambrožová, J.: Aplikovaná a technická hydrobiologie. Skripta VŠCHT Praha, 2003. 226 s. ISBN 80-7080-521-8.
- [14] Český hydrometeorologický ústav [online]. Dostupné z <www.chmu.cz>.
- [15] HUBER Technology, WASTE WATER SOLUTIONS [online]. Dostupné z <www.huber.de>.
- [16] Roediger BioEnergie [online]. Dostupné z <www.umat.de>.

- [17] Parkson Company [online]. Dostupné z <www.parkson.com>.
- [18] ČSN EN 1991-1-1 (eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. ČNI, 2003.
- [19] ČSN EN 1991-1-4 (eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. ČNI, 2007.
- [20] ČSN EN 1990 (eurokód 1): Zásady navrhování konstrukcí. ČNI, 2003.
- [21] ČSN EN 1991-1-3 (eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. ČNI, 2004.
- [22] KUNST, spol. s.r.o. Hranice [online]. Dostupné z <www.kunst.cz>.
- [23] Rothmaier GmbH & Co KG [online]. Dostupné z <<http://www.wendewolf.at/>>.
- [24] The Complete Guide to Chain[online]. Dostupné z <<http://chain-guide.com>>.
- [25] Kilkovský, B., Houdková, L., Piskovský, M.: Výměník tepla jako nosný prvek nové technologie pro energetické využití kalů. Ústav procesního a ekologického inženýrství, VUT v Brně.
- [26] Holeček O.: Posluchačské laboratoře z chemického inženýrství – Sušení [online]. Dostupné z <<http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/index.html>> .
- [27] Jícha J.: Přednášky z předmětu Difúzní pochody pro posluchače 5. ročníku Procesního inženýrství VUT v Brně.
- [28] Český statistický úřad Brno [online]. Dostupné z <<http://www.bрно.czso.cz/>>.
- [29] Pytl, V. a kolektiv.: Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. 1. vyd. Praha: SOVAK, 2004, 209 s. ISBN 80-239-2528-8
- [30] Časopis Vytápění, větrání instalace č. 1 leden 1998. Redakce fakulty Strojní, Praha.
- [31] Martínek P.: Transportní zařízení: řešené příklady. Vysoká škola báňská v Ostravě, Ostrava
- [32] ČSN EN 12255-8 (75 6403): Česká technická norma – Čistírny odpadních vod – část 8: Kalové hospodářství. ČNI 2002.
- [33] ČOV Modřice – technický popis[online]. Dostupné z <<http://www.bvk.cz/>>.
- [34] NORD Drivesystems - Homepage[online]. Dostupné z <<http://www2.nord.com/>>.

Citovaná legislativa

Zákon č.22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky - ve znění pozdějších předpisů

Zákon č.156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd - ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 185/2001Sb., o odpadech - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 376/2001 Sb., o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů) - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.

Vyhláška č. 382/2001 Sb., o používání kalů na zemědělské půdě - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady

Vyhláška č.482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy - ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č.474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva - ve znění pozdějších předpisů

Průmyslové komposty - ČSN 465735

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Výkresová dokumentace experimentální solární sušárny

Příloha č. 2: CD se zdrojovým textem DP a výkresovou dokumentací exp. sol. sušárny

Příloha č. 3: Citovaná legislativa